



**Joana Patrícia
de Castro Valente
Baptista**

**Caracterização da combustão de madeira num
fogão doméstico**



**Joana Patrícia
de Castro Valente
Baptista**

Caracterização da combustão de madeira num fogão doméstico

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho, Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro.

Este trabalho foi realizado no âmbito das actividades dos projectos PTDC/AGR-CFL/64500/2006, “Biomassa lenhosa para produção de energia: desenvolvimento de sistemas sustentáveis de fornecimento de bens e serviços de produção, regulação e conservação” e PTDC/AAC-AMB/098112/2008, “(Bias-to-soil) Cinzas de biomassa: Características em relação à sua origem, tratamento e aplicação no solo”, financiados por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

o júri

Presidente

Professora Doutora Ana Paula Duarte Gomes

Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Vogal

Professor Doutor Luís António da Cruz Tarelho

Professor Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro
(Orientador)

Vogal

Professor Doutor António João de Melo Martins Araújo

Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia e Tecnologia da Universidade Lusíada de Vila
Nova de Famalicão
(Arguente)

Agradecimentos

Aos meus pais, Denis e Florinda, aos meus irmãos Rosa, Luis e Rodrigo, ao meu namorado Tiago Tavares, aos meus amigos Patrícia Martins, Diana Santos, Sónia Pereira e Helena Almeida, pela compreensão, ânimo, força e motivação sempre presentes.

À minha prima Sylvie Baptista pela ajuda (à distância) na escrita do resumo em francês, língua que tanto admiro.

A Deus pelo apoio, inspiração e ânimo nos momentos mais difíceis do meu percurso.

Ao professor Luís Tarelho pela paciência e conhecimento transmitidos, pela ajuda na revisão da tese e pela sua exigência.

Às pessoas do departamento que me ajudaram na parte laboratorial, sobretudo à Elisabete Teixeira.

A todos os colegas de curso, professores e família que, também de algum modo, directa ou indirectamente, contribuíram, com todos os outros, para o meu crescimento pessoal, intelectual e humano, assim como para que me tornar na pessoa que sou.

Bem hajam,
Joana Baptista

palavras-chave

Biomassa, folhosas, resinosas, combustão, fogão doméstico

resumo

A combustão doméstica de biomassa lenhosa é uma forma de aquecimento bastante comum. No entanto, muitas vezes este processo está associado a tecnologias de baixa eficiência energética, e acerca das quais o conhecimento científico sobre as condições de operação é escasso. Neste contexto, é importante a avaliação das características de operação destes equipamentos de combustão doméstica de modo a permitir o desenvolvimento de modos de operação mais eficientes, e de tecnologias com melhor desempenho energético e ambiental.

Neste trabalho foi efectuada a caracterização físico-química de alguns tipos de madeira (de folhosas e de resinosas) normalmente utilizada em Portugal para aquecimento doméstico. A madeira utilizada como combustível foi caracterizada em termos da dimensão das partículas, análise imediata e análise elementar. A humidade da madeira estava na gama entre 8 e 10 %btq. A madeira de folhosas apresenta um conteúdo em cinzas superior (4,3 %btq) em relação ao observado na resinosa estudada (0,3 %btq). O conteúdo em matéria volátil da madeira está na gama 73,7 a 87,4 %btq. O conteúdo em carbono fixo na gama 9 a 26 %btq.

Foi caracterizado o processo de combustão dos diferentes tipos de madeira num fogão utilizado para aquecimento doméstico. O fogão tem um regime de operação com alimentação de cargas de biomassa. Durante a combustão duma carga de biomassa foi realizada a monitorização contínua da massa de combustível na grelha do fogão, do caudal de ar de combustão, da temperatura na câmara de combustão e ao longo da conduta de exaustão, e da composição dos gases de combustão na exaustão.

O consumo médio de biomassa durante um ciclo de combustão duma carga variou na gama 1,7 a 2,0 kg/h.

A combustão de uma carga de biomassa apresenta dois períodos distintos: i) um primeiro período, durante o qual ocorre a secagem e a combustão dos voláteis, caracterizado pela presença de chama intensa e por um elevado consumo de biomassa; e ii) um segundo período que se caracteriza pela combustão do carbonizado, pela ausência de chama e por um baixo consumo de biomassa.

Observou-se uma concentração de inqueimados (CO e CH_4) mais elevada no início do ciclo de combustão de uma carga, em resultado de uma baixa temperatura na câmara de combustão, e da não ignição da mistura gasosa resultante da desvolatilização do combustível.

Durante o período de combustão com chama observaram-se valores de temperatura na câmara de combustão, velocidade de consumo de biomassa, potência térmica e eficiência energética mais elevados. A potência térmica útil média do equipamento durante a combustão duma carga de biomassa variou na gama 6 a 7 kW_{th} , sendo os valores mais elevados observados durante a combustão de pinheiro bravo. A eficiência energética média do equipamento durante a combustão de uma carga de biomassa está na gama 61 a 68 %, sendo os valores mais elevados observados durante a combustão de eucalipto.

Do trabalho realizado pode-se concluir que não existem diferenças significativas entre a combustão de folhosas e resinosas.

Keywords

Biomass, hardwood, softwood, combustion, domestic wood stove

Abstract

The combustion of woody biomass is a very common form of heating. However, this process is often associated with low energy efficiency technologies, and about which the scientific knowledge of operating conditions is scarce. In this context, it is important to evaluate the operating characteristics of combustion equipment to enable the development of more efficient modes of operation, and of the technologies with higher energy and environmental performance.

In this work was carried out physicochemical characterization of some types of wood (hardwood and softwood) commonly used in Portugal for home heating. The wood used as fuel was characterized in terms of particle size, instant analysis and elementary analysis. Moisture content of wood was in the range between 8 and 10 %wb. The hardwood has a higher ash content (4.3 %wb) compared to that observed in the studied softwood (0.3 %wb). The volatile matter content in wood is in the range from 73.7 to 87.4 %wb. The fixed carbon content in wood is in the range 9 to 26 %wb.

Were characterized the combustion of different types of wood in a stove used for heating. The stove has a system of power operation loads of biomass. During combustion of a load of biomass was carried out continuous monitoring of the mass of fuel in the grate of the stove, the combustion air flow, temperature in the combustion chamber and along the exhaust channel, and the composition of flue gas in exhaustion.

The average consumption of biomass during a combustion cycle of a load varies in the range 1.7 to 2.0 kg/h.

The combustion of a biomass load presenting two distinct periods: i) a first period where there is the drying and the combustion of volatile matter, characterized by the presence of intense fire and high biomass consumption; and ii) a second period of combustion of the carbonized, characterized by the absence of flame and a low consumption of biomass.

It was observed high concentration of unburned compounds (CO and CH₄) in the beginning of one combustion cycle of one load, as a result of a low temperature in the combustion chamber, and non-ignition of the gas mixture as a result of the desvolatilisation of the combustible.

During the flame combustion was observed higher values of temperature in the combustion chamber, speed of consumption of biomass, thermal potency and energetic efficiency. The average potency useful of the equipment during the combustion of a load of biomass varied in the range 6 to 7 kW_{th}, where the highest values were observed during the combustion of pine. The average energy efficiency of the equipment during the combustion of a load of biomass is in the range 61 to 68 %, and the highest values were observed during the combustion of eucalyptus.

In this work, we can conclude that there aren't significant differences between the combustion of hardwoods and softwoods.

mots-clés

Biomasse, feuillus/ bois durs, bois de conifères/ résineux, combustion, fourneau à bois domestique

Résumé

La combustion de la biomasse ligneuse est une forme très courante de chauffage. Cependant, ce processus est souvent associé à des technologies à faible efficacité énergétique, et sur laquelle la connaissance scientifique sur les conditions de fonctionnement est rare. Dans ce contexte, il est important d'évaluer les caractéristiques de fonctionnement des équipements de combustion pour permettre le développement des manières d'intervention les plus efficaces de l'opération, et des technologies avec une meilleure efficacité énergétique et environnementale.

Ce travail a permis d'effectuer la caractérisation physico-chimique de certains types de bois (feuillus et résineux) couramment utilisés au Portugal pour le chauffage domestique. Le bois utilisé comme combustible a été caractérisé en termes de taille des particules, l'analyse immédiate et l'analyse élémentaire. Le contenu en humidité du bois a été dans la gamme comprise entre 8 et 10 %bh. Le feuillus a un contenu élevé en cendres (4,33 %bh) par rapport à celle observée dans le résineux étudiée (0,33 %bh). Le contenu en matériaux volatiles dans le bois est dans la gamme entre 73,72 et 87,35 %bh. Le contenu en carbone fixe dans le bois est dans la gamme entre 9 et 26 %bh.

On a pu caractériser le processus de combustion des différents types de bois dans un fourneau utilisé pour le chauffage. Le fourneau a été un système d'alimentation de charges de biomasse. Pendant la combustion d'une charge de biomasse a été réalisé le suivi continu de la masse de combustible dans la grille du fourneau, le débit d'air de combustion, la température dans la chambre de combustion le long du tube d'échappement, et la composition des gaz de combustion dans l'échappement.

La consommation moyenne de la biomasse au cours d'un cycle de combustion d'une charge varie dans la gamme entre 1,7 et 2,0 kg/h.

La combustion d'une charge de biomasse a deux périodes distinctes: i) une première période où il y a le séchage et la combustion des volatiles, caractérisée par la présence d'un feu intense et une forte consommation de la biomasse; et ii) une deuxième période de la combustion du carbonisé, caractérisé par l'absence de flamme et une consommation réduite de la biomasse.

Observés une concentration plus élevée des imbrûlés (CO et CH₄) dans le commencement de un cycle de combustion de un charge, causé par une baisse température dans la chambre de combustion, et par non-inflammation du mélange gazeux causé par la desvolatilisation du combustible.

Pendant la période de combustion avec flamme on a pu observer les températures dans la chambre de combustion, la vitesse de consommation de la biomasse, la puissance thermique et l'efficacité énergétique les plus élevées. La moyenne puissance utile de l'équipement pendant la combustion d'une charge de la biomasse variait entre 6 et 7 kW_{th}, les valeurs les plus élevées étant observées au cours de la combustion du pin. La moyenne efficacité énergétique de l'équipement, pendant de la combustion d'une charge de la biomasse, est comprise entre 61 et 68 %, avec les valeurs les plus élevées observées au cours de la combustion de l'eucalyptus.

On peut tirer la conclusion suivante du travail qui a été réalisé: l'absence de différences significatives entre la combustion de bois de feuillus et la combustion de bois de résineux.

“Beech wood fires are bright and clear,
If the logs are kept a year.
Chestnut’s only good, they say,
If for long it’s laid away.
Birch and pine logs burn too fast,
Blaze up bright and do not last.
Elm wood burns like a church yard mold,
Ev’n the very flames are cold.
Poplar gives a bitter smoke,
Fills your eyes and makes you choke.
Apple wood will scent your room
With incense like perfume.
Oak and maple, if dry and old,
Keep away the winter cold.
But ash wood wet and ash wood dry
A king shall warm his slippers by.

- Anonymous -

Índice

Índice de Figuras	iii
Índice de Tabelas	vi
Nomenclatura	vii
Símbolos Químicos.....	viii
Lista de abreviaturas.....	ix
1 Introdução.....	1
1.1 Motivação do trabalho	2
1.2 Objectivo do trabalho	3
1.3 Estrutura da tese	4
2 Biomassa florestal para aquecimento doméstico	5
2.1 Caracterização e disponibilidade da biomassa florestal em Portugal	7
2.2 Caracterização da biomassa florestal	12
2.2.1 Caracterização de folhosas e resinosas.....	12
2.2.2 Descrição do processo de decomposição térmica de uma partícula carbonácea	18
2.3 Combustão de biomassa a nível doméstico e emissões	22
2.3.1 Tecnologias de combustão doméstica de Biomassa	26
2.3.1.1 Fogões de combustão de biomassa lenhosa residual	27
2.3.2 Emissão de poluentes gasosos resultantes da combustão de biomassa	35
2.3.3 Traçadores químicos da combustão de biomassa lenhosa	38
2.3.4 Melhoria de desempenho: substituição de fogões antigos por modernos	39
2.3.5 Efeitos na saúde	42
3 Trabalho experimental	45
3.1 Selecção e preparação da biomassa combustível	45
3.2 Infra-estrutura experimental	46
3.2.1 Fogão e conduta de exaustão de gases	48
3.2.2 Sistema de amostragem e análise de gases.....	49
3.2.3 Sensor de carga	50
3.2.4 Sensor de caudal volumétrico de ar de combustão.....	50
3.3 Metodologia experimental	51
4 Resultados experimentais	53
4.1 Análise imediata e elementar da biomassa lenhosa	53
4.2 Experiências com combustão de Folhosas	57
4.2.1 Experiências com sobreiro	57
4.2.2 Experiências com carvalho negral.....	65
4.2.3 Experiências com azinheira	73

4.2.4	Experiências com Eucalipto	80
4.3	Experiências com combustão de uma resinosa.....	86
4.3.1	Experiências com Pinheiro bravo	86
4.4	Desempenho energético do fogão	93
4.4.1	Balanço mássico	93
4.4.2	Balanço energético	97
4.4.3	Eficiência térmica do fogão	100
4.4.3.1	Experiências com sobreiro	100
4.4.3.2	Experiências com carvalho negral.....	103
4.4.3.3	Experiências com azinheira	105
4.4.3.4	Experiências com eucalipto.....	106
4.4.3.5	Experiências com pinheiro bravo	107
5	Discussão dos resultados	109
6	Conclusão e sugestões	115
6.1	Conclusão	115
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	117
	Referências Bibliográficas.....	119
	Anexo A – Determinação do conteúdo em humidade, em cinzas, em matéria volátil e em carbono fixo ...	125
	Anexo B – Valores intermédios à determinação composição das amostras	129

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Representação esquemática simplificada do ciclo de carbono.	5
Figura 2.2 - Uso e ocupação do solo no território continental Português.....	9
Figura 2.3 - Evolução da ocupação florestal ao longo dos inventários florestais nacionais	10
Figura 2.4 - Risco de incêndio florestal e localização das centrais de biomassa.....	11
Figura 2.5 - Representação da estrutura da parede celular do tecido lenhoso.....	13
Figura 2.6 – Diferentes disposições de madeira para secagem, em câmara com ventilação de ar natural	17
Figura 2.7 - Fases do processo de combustão de uma partícula carbonácea.....	18
Figura 2.8 – Representação esquemática da ignição pelo topo da madeira e modo de disposição	23
Figura 2.9 – Disposição para ciclos de combustão curtos e longos, respectivamente	24
Figura 2.10 - Ignição, disposição para combustão prolongada e disposição para combustão curta.....	25
Figura 2.11 - Rede de fluxos da exploração de biomassa florestal	26
Figura 2.12 – Fogão de combustão de madeira com menores dimensões	28
Figura 2.13 - Fogão com escoamento de ar de combustão descendente (a), fogão com escoamento de ar de combustão ascendente (b) e queimador de combustíveis múltiplos (madeira, <i>pellets</i> e gásóleo) (c) ...	29
Figura 2.14 - Ilustração de um sistema catalítico	30
Figura 2.15 - Fogão não catalítico (à esquerda) e fogão catalítico (à direita).....	31
Figura 2.16 - Sistema avançado de combustão de biomassa	32
Figura 2.17 – Queimador de <i>pellets</i> , com dispensador de combustível.	34
Figura 2.18 - Penetração de material particulado nos tecidos do sistema respiratório.....	43
Figura 3.1- Tipos de biomassa lenhosa utilizadas no estudo	45
Figura 3.2 – Representação esquemática da instalação experimental.....	47
Figura 3.3 - Fogão no seu estado não operacional.	48
Figura 3.4 - Analisadores de gás, à esquerda o analisador de hidrocarbonetos e à direita os analisadores de CO ₂ , CO e O ₂	50
Figura 4.1 – Amostras de serrim de sobreiro, carvalho negral, eucalipto e pinheiro bravo.....	53
Figura 4.2 - Massa de biomassa na grelha e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com sobreiro.	58
Figura 4.3 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de sobreiro.	59
Figura 4.4 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com sobreiro.	61
Figura 4.5 – Evolução de temperaturas da câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com sobreiro.....	62
Figura 4.6 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com sobreiro.	62

Figura 4.7 - Evolução de temperatura num excerto de uma experiência com sobreiro.	63
Figura 4.8 - Concentração de gases de exaustão, CO ₂ , CO e O ₂ , durante a combustão de sobreiro.	64
Figura 4.9 - Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de sobreiro.	65
Figura 4.10 – Massa de biomassa na grelha e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com carvalho negral.	66
Figura 4.11 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de carvalho negral.	67
Figura 4.12 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com carvalho negral.	68
Figura 4.13 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com carvalho negral.	69
Figura 4.14 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com carvalho negral.	70
Figura 4.15 – Evolução de temperaturas num excerto de uma experiência com carvalho negral	71
Figura 4.16 - Concentração de gases de exaustão, CO ₂ , CO e O ₂ , durante a combustão de carvalho negral.	72
Figura 4.17 - Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão do carvalho negral.	72
Figura 4.18 - Massa de biomassa na grelha e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com azinheira.	73
Figura 4.19 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de azinheira.	74
Figura 4.20 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com azinheira.	75
Figura 4.21 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão na combustão durante a experiência com azinheira	76
Figura 4.22 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com azinheira.	77
Figura 4.23 - Evolução de temperaturas num enxerto de uma experiência com azinheira.	78
Figura 4.24 – Concentração de gases de exaustão, CO ₂ , CO e O ₂ , durante a combustão de azinheira.	79
Figura 4.25 – Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de azinheira.	79
Figura 4.26 - Massa de biomassa e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com eucalipto.	80
Figura 4.27 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de eucalipto.	80
Figura 4.28 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com eucalipto.	82
Figura 4.29 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com eucalipto.	82
Figura 4.30 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com eucalipto.	83
Figura 4.31 – Evolução de temperaturas num excerto de uma experiência com eucalipto	84

Figura 4.32 - Concentração de gases de exaustão, CO ₂ , CO e O ₂ , durante a combustão de eucalipto.	85
Figura 4.33 - Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de eucalipto.	85
Figura 4.34 - Massa de biomassa e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com pinheiro bravo.	86
Figura 4.35 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de pinheiro bravo.	87
Figura 4.36 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com pinheiro bravo.	88
Figura 4.37 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com pinheiro bravo	89
Figura 4.38 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com pinheiro bravo.	90
Figura 4.39 - Evolução de temperaturas num excerto de uma experiência com pinheiro bravo.	91
Figura 4.40 – Concentração de gases de exaustão, CO ₂ , CO e O ₂ , durante a combustão de pinheiro bravo. .	92
Figura 4.41 – Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de pinheiro bravo.	92
Figura 4.42 – Perfil de potências na experiência de combustão com sobreiro.	102
Figura 4.43 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com sobreiro.	103
Figura 4.44 - Perfil de potências na experiência de combustão com carvalho negral.	104
Figura 4.45 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com carvalho negral.	104
Figura 4.46 - Perfil de potências na experiência de combustão com azinheira.	105
Figura 4.47 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com azinheira.	106
Figura 4.48 - Perfil de potências na experiência de combustão com eucalipto.	106
Figura 4.49 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com eucalipto.	107
Figura 4.50 - Perfil de potências na experiência de combustão com pinheiro bravo.	108
Figura 4.51 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com pinheiro bravo.	108
Figura 5.1 – Velocidade média de consumo de biomassa nas experiências de combustão.	110
Figura 5.2 - Temperatura média na câmara de combustão e nos gases de exaustão nas experiências de combustão.	111
Figura 5.3 - Potências médias do equipamento nas experiências de combustão.	113
Figura 5.4 - Eficiência de conversão energética média do equipamento nas experiências de combustão. .	114

Índice de Tabelas

Tabela 2.1- Distribuição por cada tipo de ocupação do solo, em Portugal Continental	9
Tabela 2.2 - Composição química da madeira (bs)	14
Tabela 2.3 - Composição elementar típica da madeira (bs)	15
Tabela 2.4 – Densidade de cinco tipos de madeira	15
Tabela 4.1 – Caracterização elementar e imediata das amostras de biomassa em estudo.....	55
Tabela 4.2 – Poder calorífico inferior dos tipos de biomassa em estudo.....	56
Tabela 4.3 - Massa de cada carga nas experiências de combustão com madeira de folhosas.	57
Tabela 4.4 - Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com sobreiro.	60
Tabela 4.5 – Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com carvalho negral.	68
Tabela 4.6 - Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com azinheira.	75
Tabela 4.7 - Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com eucalipto.....	81
Tabela 4.8 - Massa de cada carga na experiencia de combustão com pinheiro bravo.	86
Tabela 4.9 – Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com pinheiro bravo.	88
Tabela 4.10 – Valores estimados para a razão de oxigénio estequiométrico por massa de biomassa (bs). ...	95
Tabela 4.11 – Poder calorífico dos gases inqueimados, CO e CH ₄	100

NOMENCLATURA

C_{pi}	Calor específico do gás de exaustão i	[J/kg.K]
$C_{p_{ar}}$	Calor específico do ar	[J/kg.K]
$C_{p_{H_2O(g)}}$	Calor específico do vapor de água a pressão constante	[J/kg.K]
C_{p_w}	Calor específico da água líquida a pressão constante	[J/kg.K]
$h_{wv,T^{\circ}}$	Calor latente de vaporização da água	[J/kg]
G_m	Caudal molar de gases húmidos	[mol gases húmidos/ s]
G_{m_i}	Caudal molar de gás i em gases húmidos	[mol i/s]
G_v	Caudal volumétrico de ar de combustão	[Nm ³ /h]
M_i	Massa molar do gás i	[kg/kmol]
M_{ar}	Massa molar do ar seco	[kg/kmol]
$n_{i,R}$	Numero de moles de gás i, por massa de biomassa em base seca	[kmol i/ kg biomassa bs]
P	Pressão absoluta	[Pa]
P_{th}	Potência térmica	[kW _{th}]
PCI_j	Poder calorífico inferior de gases inqueimados j	[MJ/kg]
PCI_R	Poder calorífico inferior da biomassa lenhosa	[MJ/kg]
PCS_R	Poder calorífico superior da biomassa lenhosa	[MJ/kg]
R	Constante dos gases perfeitos (8314 J/(kmol.K))	[J/ kmol.K]
T_A	Temperatura do ar de combustão	[K]
T_9	Temperatura dos gases de exaustão	[K]
T°	Temperatura de referência (273 K)	[K]
W_a	Razão mássica actual de oxigénio de combustão	[kg ar actual/kg biomassa bs]
W_{AR}	Razão mássica actual de ar de combustão	[kg ar seco/kg biomassa bs]
W_{jR}	Razão mássica do elemento j, em base seca	[Kg j/kg biomassa bs]
W_s	Razão mássica estequiométrica de oxigénio de combustão	[kg O ₂ estequiométrico/kg biomassa bs]
W_{VA}	Razão mássica de vapor de água (razão de mistura)	[kg vapor/kg ar seco]
W_{WR}	Razão mássica de humidade da biomassa lenhosa em base seca	[kg água/kg biomassa bs]
W_{ZR}	Razão mássica em cinza na biomassa lenhosa	[kg cinza/kg biomassa bs]
y_i	Fracção de gás i em gases húmidos	[mol i/mol gases húmidos]
y'_i	Fracção de gás i em gases secos	[mol i/mol gases secos]
y_{O_2}	Fracção de oxigénio no ar seco	[mol O ₂ /mol ar seco]
η_{th}	Eficiência térmica	[%]

SÍMBOLOS QUÍMICOS

Al	Alumínio
C	Carbono
CeO ₂	Óxido de cério
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
Cl	Cloro
Cr	Crómio
EC	Carbono elementar
Fe	Ferro
H ₂	Hidrogénio
HC	Hidrocarbonetos
H ₂ O	Água
PAH	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
K	Potássio
Ni	Níquel
NMVOC	Compostos orgânicos voláteis não-metano
NO _x	Óxido nitroso
O	Oxigénio elementar
O ₂	Oxigénio molecular
OC	Carbono orgânico
Pd	Paládio
PM	Material particulado
PM _{2,5}	Material particulado de tamanho inferior ou igual a 2,5 µm (partículas ultrafinas)
PM ₁₀	Material particulado de tamanho inferior ou igual a 10 µm, mas superior a 2,5 µm
Pt	Platina
SiO ₂	Sílica (dióxido de silício)
SO ₂	Dióxido de enxofre
TOC	Carbono orgânico total
VOC	Compostos orgânicos voláteis

LISTA DE ABREVIATURAS

bs	base seca
btq	base tal e qual
EUA	Estados Unidos da América
GEE	Gases com efeito de estufa
INE	Instituto Nacional de Estatística
OMS	Organização Mundial de Saúde
US-EPA	Agência de Protecção do Ambiente dos Estados Unidos

1 INTRODUÇÃO

O território nacional possui cerca de um terço de floresta, dos quais quase 75 % é ocupada maioritariamente por pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), eucalipto (*Eucalyptus globulos*) e sobreiro (*Quercus suber*). A aplicação da madeira como combustível oferece vantagens ecológicas e económicas, desde a conservação dos recursos energéticos fósseis, redução da dependência externa ao nível do comércio de combustíveis, utilização de resíduos agrícolas e de floresta, redução da emissão de espécies pesadas e prejudiciais pelos combustíveis fósseis, reflorestação e recultivo sem usar áreas dedicadas à agricultura e a minimização da disposição de resíduos biodegradáveis em aterro (Dermibas, 2005).

A combustão de resíduos de biomassa em equipamento doméstico é uma forma de valorização deste combustível, no entanto é necessário agir localmente para obter um benefício global. Portanto, a promoção do desenvolvimento dos equipamentos já existentes (menos eficientes e menos desenvolvidos) constitui um aspecto de grande relevância na medida em que conduz ao aperfeiçoamento do desempenho e eficiência dos mesmos, no aquecimento do ar interior e/ou aquecimento de água para uso doméstico. Esta medida é essencial para a comunidade de menores rendimentos, pois, valendo-se de um recurso mais acessível, é-lhe permitida a manutenção de uma habitação cómoda termicamente, melhorando a qualidade de vida.

Neste contexto a biomassa residual florestal é fortemente empregue no aquecimento doméstico em aldeias, áreas pouco populosas e países em desenvolvimento. As comunidades de menores recursos económicos usualmente têm acesso facilitado a pinhais ou porções de floresta donde extraem a biomassa que precisam para o aquecimento da água em caldeira, para cozinhar ou para aquecimento do ar interior (Koyuncu & Pinar, 2006). A madeira utilizada para o aquecimento doméstico pode ser adquirida em fontes comerciais, como madeireiros locais. Os baixos preços de alguns tipos de madeira podem conduzir ao favorecimento na sua procura em detrimento de outros (Schmidl *et al.*, 2008).

No geral as energias obtidas a partir de combustíveis fósseis têm um custo mais elevado, por energia produzida, que a conversão de biomassa em energia, assim como a biomassa é mais acessível economicamente que outras formas de energia renovável (Dermibas, 2005).

Apesar de nos países menos desenvolvidos a biomassa florestal ser uma das principais fontes de energia para aquecimento doméstico, esta tem-se tornado uma fonte de energia cada vez menos

utilizada, uma vez que a quantidade de energia produzida é menor em comparação com outras fontes de energia não renovável, sendo necessário um volume 12,5 vezes superior de biomassa residual. Ainda comparando com outras fontes de energia, recorrer à exploração de biomassa pode tornar-se mais dispendioso caso se efectue o transporte dos resíduos florestais triturados *in situ* e também pelo facto das florestas portuguesas, em específico, serem dispersas, fragmentadas e por possuírem carácter privado (Cardoso, 2010).

A continuação da utilização de lareiras (fogões abertos) acarreta graves problemas, uma vez que impregna o ar interior com partículas, que contribuem para um aumento das doenças cardiovasculares, pulmonares e morte precoce. Outro aspecto relevante é a sua ineficiência comparativamente com os fogões fechados, estes podem incluir controlo de partículas, por exemplo recorrendo a barreiras físicas ou a catalisador, para controlo e/ou redução das emissões gasosas. Os equipamentos de combustão de madeira são mais acessíveis economicamente do que qualquer outro sistema de aquecimento doméstico que recorra a outros combustíveis, na grande maioria importados e de carácter não renovável.

Em muitos países a maior fonte de material particulado são os transportes, embora a combustão doméstica de madeira contribua com partículas com elevado conteúdo em compostos orgânicos para o ar ambiente local. Em áreas populosas a combustão é uma via comum para o aquecimento, embora existam alguns problemas nomeadamente na qualidade do ar associado. Estes devem ser solucionados trocando fogões antigos por modelos mais recentes e certificados ou mesmo removendo os antigos por completo reduzindo assim a exposição da população ao fumo de combustão (Allan *et al.*, 2009; Tissari *et al.*, 2007).

Porém, é mais fácil desenvolver a utilização de biomassa no aquecimento urbano ou colectivo que no aquecimento doméstico, por permitir o controlo e a melhoria da gestão dos combustíveis fósseis, possibilitando menores emissões associadas (Sá, 2009). Por tudo isto, a combustão de madeira é considerada uma fonte de energia renovável de grande relevância a nível global.

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

A biomassa florestal residual é um recurso renovável muito utilizado actualmente em equipamentos de combustão doméstica. Infelizmente, nem todos os equipamentos de combustão usados a nível doméstico estão optimizados, porque apesar de estas tecnologias terem sofrido

grandes evoluções ao longo dos anos, as mesmas evoluções não foram acompanhadas ao nível de substituição doméstica.

A combustão de biomassa lenhosa tem emissões associadas, sendo que a emissão de alguns poluentes gasosos revela-se superior comparativamente com a combustão de combustíveis fósseis, no entanto tem a vantagem de ser mais económica e de não possuir um potencial tão elevado de aquecimento global. Ao nível doméstico, se falarmos em termos de lareiras, a combustão neste tipo de equipamento acarreta problemas de qualidade do ar interior, conduzindo a doenças pulmonares e cardiovasculares. Em fogões mais modernos e eficientes estes problemas são minimizados, uma vez que recorrem a catalisadores, barreiras físicas e câmaras de combustão com um funcionamento interno que não permite contaminação do ar interior com gases de combustão, e além disso, contribuem para uma estética agradável e maior conforto, porque são instalados no interior da habitação.

1.2 OBJECTIVO DO TRABALHO

O objectivo deste trabalho consistiu na caracterização do processo de combustão de diferentes tipos de biomassa florestal (madeira de folhosas e resinosas) num fogão para aquecimento doméstico. Como madeira de folhosas tem-se sobreiro, carvalho negral, azinheira e eucalipto e como madeira de resinosas apenas pinheiro bravo. O fogão utilizado é dedicado à produção de ar quente, sendo operado de forma descontínua com aplicação de cargas sucessivas de madeira.

Os objectivos do trabalho incluem:

- Caracterização físico-química da madeira utilizada;
- Realização de experiências de combustão de madeira num fogão para aquecimento doméstico;
- Caracterização do processo de combustão de diferentes tipos de madeira (folhosas e resinosas);
- Avaliação do desempenho do equipamento de combustão.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho está organizado em seis capítulos. No Capítulo 1 faz-se a ligação do leitor ao tema geral do trabalho, demonstrando a motivação para o estudo e a organização e estruturação da dissertação.

No Capítulo 2 é analisada a disponibilidade da biomassa florestal em Portugal, ou seja a sua distribuição geográfica, seguindo-se uma análise sobre algumas características em termos de de comparação física, química, e a diferença entre a madeira de folhosas e resinosas. Posteriormente é apresentada alguma informação sobre a combustão de biomassa, com base na literatura. No final do capítulo é apresentada alguma informação sobre alguns equipamentos de combustão doméstica de biomassa lenhosa.

No Capítulo 3 é apresentada informação experimental, em particular no que diz respeito à infraestrutura experimental onde foram realizadas as experiências de combustão.

No Capítulo 4 é apresentado o tratamento da informação experimental obtida e realizada a análise dos resultados experimentais, nomeadamente acerca da caracterização da biomassa, monitorização das experiências de combustão com madeira de folhosas e resinosas, determinação das potências térmicas do equipamento e respectiva eficiência energética.

No Capítulo 5 é realizada a comparação entre os resultados experimentais obtidos para os vários tipos de madeira utilizada nas experiências de combustão, com o objectivo de comparar o desempenho do equipamento.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e alguma sugestão para trabalhos a efectuar no futuro.

2 BIOMASSA FLORESTAL PARA AQUECIMENTO DOMÉSTICO

A biomassa é uma fonte de energia renovável dado que utiliza no seu ciclo de vida radiação solar como fonte de energia. A luz solar no processo fotossintético auxilia na síntese de compostos orgânicos e oxigénio, e na combustão de biomassa é libertado dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera, composto absorvido pela biomassa, em proporção idêntica, durante o seu ciclo de vida e de crescimento. Esta sequência de transformações é vulgarmente designada por “Ciclo de Carbono”, sendo possível observar esquematicamente na Figura 2.1. Para uma gestão sustentável das fontes de biomassa é necessário que este ciclo não seja interrompido (Abreu, 2009; Saidur *et al.*, 2011). O processo fotossintético ocorre segundo a Equação 2.1, a qual descreve a conversão da luz captada pelas plantas em energia química essencial à sua sobrevivência.



Equação 2.1

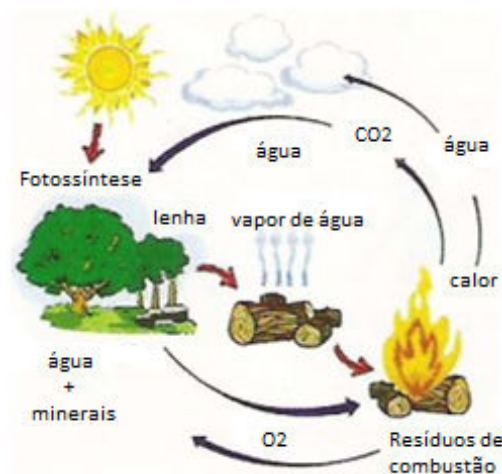


Figura 2.1 – Representação esquemática simplificada do ciclo de carbono (adaptado Cardoso, 2010).

Deste modo, por vezes, o recurso à madeira, tanto para a produção de electricidade, uso doméstico ou transportes, é mencionado como neutro em termos de emissões de CO_2 . No entanto, não é de todo verdade, porque não são tidos em conta os combustíveis fósseis associados à sua recolha, o transporte desde o local onde foram extraídos e ou recolhidos, os

consumos inerentes à transformação da biomassa e as emissões consequentes (Santos, *et al.*, 2008). Assim sendo, o que é possível mencionar é que a combustão de biomassa, em especial a lenhosa, não contribui para uma emissão adicional de CO₂ em comparação com os combustíveis fósseis (Ozil *et al.*, 2009). A emissão de CO₂ é neutra se a biomassa for consumida de forma sustentável e o *stock* de biomassa não sofrer diminuição significativa no tempo, o que nem sempre é respeitado, principalmente em países em desenvolvimento (Dermibas, 2005).

Com o Protocolo de Quioto os países desenvolvidos concordaram com a finalidade colectiva de se comprometerem a reduzir as suas emissões de gases com efeito de estufa (GEE) em 5,2 % no período de 2008 a 2012, relativamente aos níveis do ano de 1990. Segundo o Relatório do Estado do Ambiente (IA, 2005) em Portugal no ano de 1990 a emissão de GEE correspondia a 60 Mton (mega toneladas) de CO₂ equivalente. Tendo em vista o cumprimento das metas estabelecidas, os biocombustíveis surgem como uma mais-valia na substituição dos combustíveis fósseis (não renováveis), dado que estes possuem um papel significativo ao nível das alterações climáticas, tendo aplicação em diversas áreas desde os transportes às tecnologias de aquecimento doméstico (Freitas, 2008).

Uma alternativa para cobrir as necessidades futuras em energias renováveis, é a produção de biocombustível denso peletizado utilizando resíduos florestais e de processamento de biomassa florestal (Parikka, 2004).

Existem outros problemas associados às alterações climáticas resultantes da emissão de poluentes emitidos por combustão de biomassa como a alteração do pH da chuva e a afectação ao nível do balanço térmico na atmosfera pela interferência com a radiação solar absorvida e reflectida efectivamente para o espaço, ou seja alterações no albedo terrestre (Arbex *et al.*, 2004; Simoneit *et al.*, 2002). A poluição resultante da combustão de biomassa no aquecimento doméstico contribui para a acumulação de poluentes ao nível dos telhados (10 metros sensivelmente) nas zonas residenciais e no Inverso dão-se inversões térmicas causadas pela estagnação de massas de ar e degradação da visibilidade (Houck *et al.*, 1989).

É fundamental recorrer nos dias de hoje a fontes de energia renovável tendo-se notado uma evolução no interesse e preocupação pelas questões ambientais e ecológicas, dado que, o recurso a fontes alternativas reduz a emissão de CO₂, assim como de outros GEE (Ozil *et al.*, 2009).

Também o uso de madeira, como combustível para a produção de energia, permite reduzir as emissões de dióxido de carbono e de dióxido de enxofre (SO₂) em comparação com os combustíveis fósseis. A biomassa florestal é uma fonte de recursos que possui um período de

renovação relativamente curto, além disso a sua aplicação contribui para a redução da dependência energética externa (Santos *et al.*, 2008; Sá, 2009).

Existem diferenças significativas entre a biomassa e o carvão, no que diz respeito à composição inorgânica, orgânica, poder calorífico e propriedades físicas. Em comparação com o carvão, a biomassa é mais pobre em carbono (C), alumínio (Al) e ferro (Fe), em contraposição é mais rica em oxigénio (O), sílica (SiO₂) e potássio (K), tem um menor poder calorífico, maior conteúdo em humidade, menor densidade e é menos quebradiça. O cloro (Cl) é o principal factor da formação de cinzas. Comparativamente com a maioria dos carvões a biomassa tem um valor inferior de poder calorífico, uma vez que possui maior conteúdo em humidade e em oxigénio (Dermibas, 2005; Ndiema *et al.*, 1998).

Segundo alguns estudos, a composição química da biomassa florestal pode causar depósitos durante e após a combustão originando a formação de escórias e incrustações na instalação, nomeadamente de cinzas. Tal como acontece com a combustão de biomassa, a combustão de resíduos sólidos urbanos em incineradoras para a produção de electricidade, origina atmosferas corrosivas, colocando limitações nas temperaturas do vapor a atingir e na eficiência eléctrica. Contudo, o ataque corrosivo poderá ser reduzido pela co-combustão de biomassa ou resíduos, juntamente com carvão em tecnologias de leito fluidizado (Santos *et al.*, 2008).

Conjugando o conteúdo elevado de carbono do carvão e o conteúdo elevado de matéria volátil da biomassa consegue-se melhorar o processo de combustão em relação à combustão destes combustíveis separadamente (Werther *et al.*, 2000). Assim, segundo Dermibas (2005) a co-combustão de carvão para produção de electricidade com biomassa será um método promissor num futuro próximo.

2.1 CARACTERIZAÇÃO E DISPONIBILIDADE DA BIOMASSA FLORESTAL EM PORTUGAL

A floresta é a principal fonte de biomassa em Portugal, representando cerca de um terço do território total do país, sendo considerada um recurso estratégico. Contudo necessita de uma exploração planeada de modo sustentável, no qual o potencial energético e a oferta/procura devem ser mensurados. É por isso importante que o uso deste recurso seja efectuado de forma sustentável para evitar pressões ambientais, como por exemplo, a limitação da extracção de restos de plantas ou árvores, como folhagem, ramos e raízes, importantes na fertilização natural dos solos, regulação dos fluxos de água, criação de habitats, assim como no combate à erosão.

Portanto, evitam-se situações de deficiência de nutrientes, acidificação e infertilidade dos solos explorados (Oliveira, 2008; Pedro, 2009). Outro problema, são as más práticas agrícolas que envolvem por vezes grande uso de fertilizantes e pesticidas que alteram a composição do solo, mas também da biomassa (Launhardt & Thoma, 2000).

Se a biomassa for extraída de áreas sensíveis poderá comprometer a bacia hidrográfica, levando à sua degradação, bem como de áreas de captação e à perda de biodiversidade e habitats. Logo, é necessário recorrer a uma produção sustentável da biomassa, como por exemplo a plantação de espécies bioenergéticas em áreas desflorestadas, tendo em conta a manutenção de solos para produção agrícola alimentar. O futuro do aquecimento com biomassa dependerá muito do mercado dos combustíveis fósseis, das medidas políticas que regem os combustíveis, da intervenção directa do Estado no mercado e da criação de legislação (Saidur *et al.*, 2011).

Por isso é importante valorizar a biomassa, minimizando os refugos de matérias-primas sob a forma de resíduo da sua exploração, que podem ser valorizados no contexto da criação de novos combustíveis. Deste modo, a evolução na qualidade e no modo de produção destes novos combustíveis deverão incluir o aumento do rendimento energético por hectare, com vista à criação de biomassa a baixo custo de comercialização, tornando-se mais competitiva a nível do mercado dos combustíveis (Saidur *et al.*, 2011).

Tendo por base o 5º Inventário Florestal Nacional (2010) é possível admitir que em Portugal Continental a área ocupada por floresta é de 3 458 mil hectares sensivelmente, onde os matos ocupam apenas 1 927 mil hectares e a área disponível para a agricultura é de 2 929 mil hectares (Pinho¹, 2010).

Na Tabela 2.1 e na Figura 2.2 é demonstrada a distribuição do uso do solo em Portugal Continental. A distribuição do coberto florestal depende da região, do tipo de coberto, das espécies que o compõem, do clima predominante, do tipo de solo, entre outros aspectos (Pinho¹, 2010). Pela observação da Figura 2.1 observa-se que a região com maior área de floresta é o Alentejo, seguindo-se a região centro, o Norte, Lisboa e Vale do Tejo e por último o Algarve, sendo este o que possui uma menor área florestal.

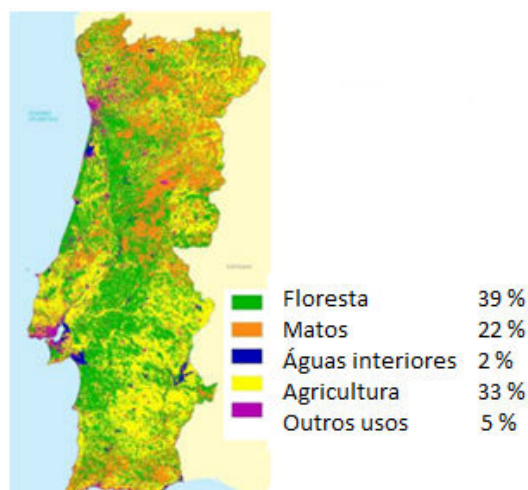


Figura 2.2 - Uso e ocupação do solo no território continental Português (adaptado de Pinho¹, 2010).

Tabela 2.1- Distribuição por cada tipo de ocupação do solo, em Portugal Continental (Pinho¹, 2010).

Uso do solo	Área ocupada (ha)
Floresta	3 458 557
Matos	1 926 630
Agricultura	2 929 544
Águas interiores	161 653
Outros usos	432 050

Em termos de povoamento florestal, o mais abundante em Portugal Continental é o pinheiro bravo, ocupando 885 019 hectares, seguindo-se o eucalipto (739 515 hectares), o sobreiro (715 922 hectares), a azinheira (*Quercus ilex*) (412 878 hectares), o carvalho (*Quercus faginea*) (150 020 hectares), o pinheiro manso (*Pinus pinea*) (130 386 hectares) e os restantes 137 511 hectares são ocupados por povoamentos de outras resinosas e por outras folhosas, nomeadamente o castanheiro (*Castanea sativa*) e a acácia (*Acacia dealbata*), sendo esta última uma espécie proveniente da Austrália, assim como o eucalipto (Pinho¹, 2010).

As espécies que se destacam no armazenamento de carbono, sob a forma de CO₂, são o pinheiro bravo, o eucalipto e o sobreiro. Em termos de evolução da ocupação florestal ao longo de vários inventários florestais nacionais, entre 1963 e 2006, pela Figura 2.3 observa-se que o eucalipto tem tido um crescimento significativo e que os montados de sobreiro obtiveram uma estagnação a partir de 1993, assim como os pinhais e outras povoações de resinosas a partir de 1995 (Pinho¹, 2010).

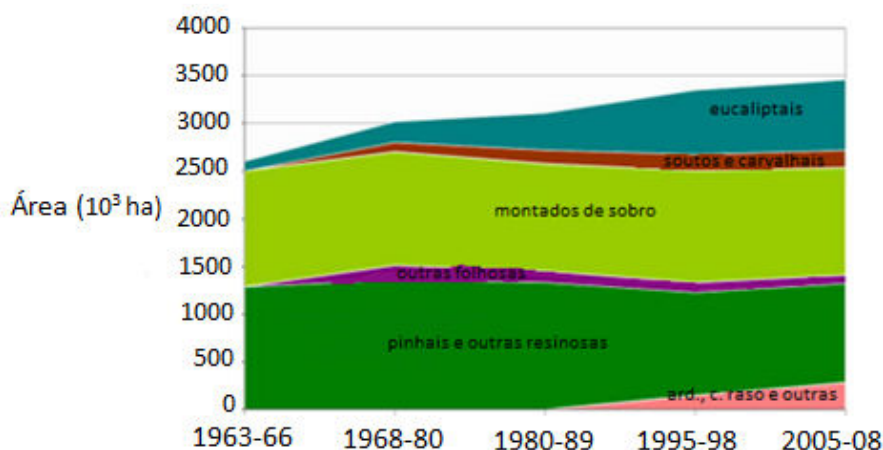


Figura 2.3 - Evolução da ocupação florestal ao longo dos inventários florestais nacionais (adaptado de Pinho¹, 2010).

O uso da biomassa florestal como fonte energética afigura-se como um importante meio para o cumprimento das metas estipuladas pelo Protocolo de Quioto, no ordenamento e na gestão da floresta e na diminuição da ocorrência de incêndios florestais.

Os incêndios têm afectado principalmente os povoamentos de pinheiro, contribuindo para uma redução de 1 250 mil hectares para 710,6 mil hectares entre os anos de 1982 e 2005. Com vista a terminar com este flagelo, em 2006 criou-se um concurso para atribuição de quinze novas centrais de biomassa. Sendo assim, o estado português permitiu que o grupo Altri/EDP efectuasse a construção de mais cinco centrais e a ampliação da potência de 10 para 20 MW na Central de Mortágua, que já se encontrava em funcionamento desde 2003. Para além da central de Mortágua existe também a Central de Centroliva de 3 MW em Vila Velha de Ródão.

Na Figura 2.4 é realçado o risco de incêndio associado ao território nacional e a localização das novas centrais de biomassa, sendo possível visualizar a presença de uma correlação e/ou sobreposição (Pedro, 2009).

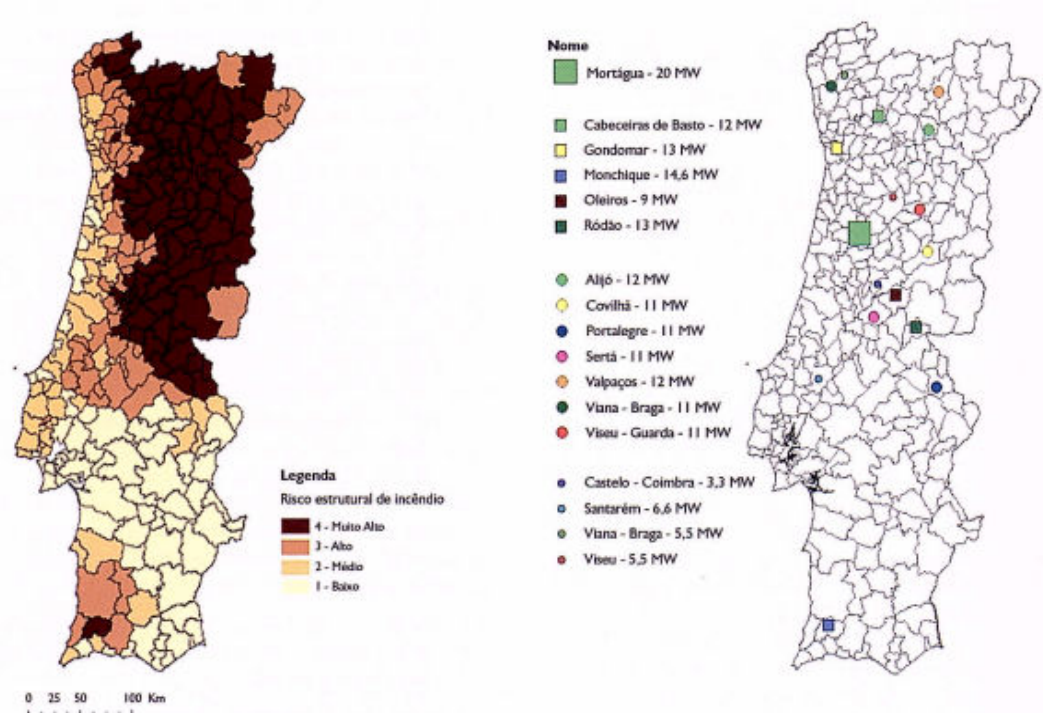


Figura 2.4 - Risco de incêndio florestal e localização das centrais de biomassa (Pedro, 2009).

As centrais ao promoverem operações de limpeza da floresta através da exploração florestal e da recolha de resíduos das matas, como operações de desbaste e desramação, promovem a rentabilização económica da floresta, transformando os desperdícios desta actividade numa matéria-prima para a indústria da energia. A redução sustentável da carga combustível na floresta contribuirá para a prevenção e redução da intensidade de incêndios florestais, deste modo substitui-se a combustão na natureza por uma combustão em meio controlado. Colaborará ainda para incrementar a criação de mais postos de trabalho, para o desenvolvimento regional e para a redução da taxa de abandono rural e de desertificação. A redução da carga de biomassa residual na floresta é ainda responsável por uma maior segurança na diversificação das fontes energéticas utilizadas e na melhoria da produtividade florestal (Pedro, 2009; Cardoso, 2010).

Todavia, o grande obstáculo que limita a aplicação de políticas florestais para o desenvolvimento da floresta é o facto de esta ser gerida por entidades privadas, detentoras de pequenas áreas fragmentadas, aspecto que dificulta a rentabilização da exploração florestal (Cardoso, 2010). Apesar de tudo isto, actualmente verifica-se que nas florestas, após os incêndios, não ocorre remoção dos resíduos de biomassa ardida, nem se procede à reflorestação, o que contraria os princípios da sustentabilidade.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA FLORESTAL

A escolha do tipo de biomassa, para um sistema de aquecimento doméstico, é um passo importante para atingir um aquecimento eficiente, seguindo-se a determinação da melhor configuração da biomassa na grelha. No entanto, esta decisão é tomada tendo em conta vários factores desde económicos, sociais, ambientais e aspectos de segurança (Dermibas, 2005).

Deste modo, é importante caracterizar cada tipo de biomassa disponível, existindo duas classes de biomassa lenhosa:

- As **dicotiledóneas**, da divisão das angiospérmicas, designadas por folhosas, principalmente decíduas, ou seja, de folha caduca, cujas sementes têm um determinado tipo de cobertura (URL2; URL4).
- As **gimnospérmicas**, designadas por coníferas, com sementes que não possuem cobertura, as folhas são perenes, sempre verdes, podendo possuir folhas em agulha, que lhes possibilitam reduzir as perdas de humidade. As coníferas podem também ser designadas por resinosas embora seja uma classificação menos correcta uma vez que nem todas as coníferas são na realidade resinosas (URL2; URL4).

Em literatura anglo-saxónica as coníferas são designadas de *softwood* e as folhosas de *hardwood*, estas últimas são designadas deste modo pelo facto da sua madeira ser mais densas (Ferreira, 2000). O estudo destes tipos de biomassa lenhosa é importante, nomeadamente ao nível do estudo das suas características, como a densidade, o conteúdo de humidade, o conteúdo em hemicelulose, celulose, lenhina e compostos extractáveis, de forma a compreender as implicações da presença destes constituintes no desempenho da combustão.

Em Portugal, a madeira de folhosas é representada principalmente pelo sobreiro, carvalho negral, azinheira e eucalipto e no caso da madeira de resinosas existe o pinheiro bravo, o pinheiro manso, o abeto e o cedro, ainda que estes dois últimos sejam minoritários.

2.2.1 CARACTERIZAÇÃO DE FOLHOSAS E RESINOSAS

A madeira é uma substância heterogénea e porosa, sendo constituída por materiais lenhinocelulósicos subdivididos em dois componentes principais, os estruturais e os não estruturais. Os estruturais são os polímeros que constituem as paredes celulares do material

vegetal portanto caracterizam a sua estrutura mecânica, como a celulose, as hemiceluloses e a lenhina. Por outro lado, os não estruturais são compostos orgânicos de massa molecular baixa ou média, menos abundantes na natureza e podem possuir natureza química diversa, podendo ser compostos alifáticos, terpenos, esteróis, compostos fenólicos, entre outros. Os constituintes não estruturais são designados comumente de extractáveis, por serem facilmente extraídos pela aplicação de solventes orgânicos e soluções aquosas, existindo ainda a fracção inorgânica designada por cinzas (Camacho, 2008). O conteúdo em cinza da madeira de folhosas é superior ao conteúdo observado em resinosas, sendo que, genericamente, é dado respectivamente por 0,5 % e 0,4 % (Dermibas, 2005; Larson & Koenig, 1994).

O conteúdo elevado em extractáveis pode ser resultado da sua migração para a superfície durante o período de armazenamento, acumulando-se na epiderme da madeira. Na madeira de resinosas o aumento do conteúdo em extractáveis está associado à variação da temperatura ao longo do período de armazenamento (Nielsen *et al.*, 2008).

As fibras de celulose apresentam uma estrutura cristalina, possuindo nos seus espaços heteropolímeros amorfos de lenhina e hemicelulose (Figura 2.5) (Freitas, 2008). A lenhina encontra-se associada à celulose e possui a função de conferir rigidez, impermeabilizar e proteger os tecidos vegetais de ataques microbiológicos e mecânicos (Oliveira, 2008).

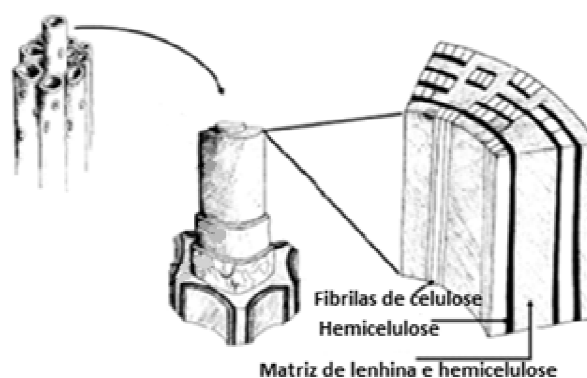


Figura 2.5 - Representação da estrutura da parede celular do tecido lenhoso (adaptado de Freitas, 2008).

A maior fracção de materiais lenhinocelulósicos na biomassa é ocupada por 40 a 50 %bs de celulose, 20 a 30 %bs de lenhina e 20 a 30 %bs de hemicelulose, expressos em base seca (bs). Em termos de conteúdo em extractáveis este pode variar entre 2 a 3 %bs, embora apresente valores

superiores em algumas resinosas e folhosas tropicais, sendo assim, é superior na madeira de resinosas comparativamente com a madeira de folhosas. No total, os polímeros estruturais, celulose, hemicelulose e lenhina, constituem tipicamente 95 %bs do peso da madeira (Freitas, 2008; Nielsen *et al.*, 2008).

O conteúdo em extractáveis afecta directamente o poder calorífico, dado que quanto maior o conteúdo em extractáveis mais elevado é o poder calorífico, portanto valores elevados fazem com que uma espécie de biomassa, ou parte dela, seja mais desejável como combustível (Dermibas, 2005).

Entre os dois tipos de madeira existem diferenças, sendo possível referir que as resinosas possuem maior conteúdo em celulose, hemicelulose, produtos de extracção e resina, ao passo que as folhosas podem possuir um maior conteúdo em lenhina, apesar de ser uma diferença pouco significativa (URL2). Porém, a composição química da madeira dentro duma mesma espécie pode variar devido à diferente localização geográfica, ao clima, as condições do solo, ao tipo de madeira e à idade (Camacho, 2008).

Na Tabela 2.2 resume-se a composição química típica da madeira de folhosas e resinosas, em base seca.

Tabela 2.2 - Composição química da madeira (bs) (Camacho, 2008; Freitas, 2008, Saidur, *et al.*, 2011).

Constituintes	Biomassa lenhosa	Madeira de resinosas	Madeira de folhosas
Conteúdo em celulose	40,0 – 50,0 %	45,8 %	45,3 %
Conteúdo em lenhina	20,0 – 30,0 %	28,0 %	21,7 %
Conteúdo em hemicelulose	20,0 – 30,0 %	24,4 %	31,3 %
Conteúdo em extractáveis	2,0 – 3,0 %	2,0 – 3,0 %	

A composição elementar (conteúdo em carbono, hidrogénio e oxigénio) é uma característica importante na caracterização da biomassa. Quando comparada com o carvão, a biomassa possui mais oxigénio na sua constituição, variando entre 30 a 40 %bs, uma vez que na sua estrutura possui essencialmente hidratos de carbono. O conteúdo em carbono ronda entre 30 a 60 %bs, dependendo do conteúdo em cinzas, e o conteúdo em hidrogénio varia entre 5 a 6 %bs. O conteúdo em azoto, enxofre e cloro apresenta quantidades menos significativas que correspondem a 1 %bs, sendo que, estes elementos são responsáveis pela emissão de espécies gasosas poluentes como óxidos de azoto (NO_x) durante a queima de madeira (Saidur *et al.*, 2011).

Na Tabela 2.3 encontra-se a composição elementar da madeira, em base seca.

Tabela 2.3 - Composição elementar típica da madeira (bs) (Jenkins *et al.*, 1998).

Composição elementar	Biomassa lenhosa
Oxigénio	30 – 40 %
Carbono	30 – 60 %
Hidrogénio	5 – 6 %
Azoto, Enxofre, e Cloro	1 %

O conteúdo em carbono e hidrogénio contribui para o incremento do poder calorífico, ao passo que o conteúdo em oxigénio contribui para a sua redução (Saidur *et al.*, 2011; Dermibas, 2005).

A biomassa lenhosa é também constituída por componentes minoritários tais como lípidos, açúcares simples (pectinas), amido, proteínas, água, hidrocarbonetos, cinzas, entre outros. A concentração de cada componente referido depende da espécie presente, do tipo de tecido e do estado e condições de crescimento (Dermibas, 2005).

Segundo Salazar *et al.* (1998) a densidade da madeira de folhosas ronda os 600 kg/m³, ao passo que, a da madeira de resinosas varia entre 480 e 500 kg/m³. Assim, tendo em conta que a madeira de folhosas possui uma densidade superior à madeira de resinosas, se admitirmos um igual volume dos dois tipos de madeira, a combustão de folhosas geralmente permitirá obter maior potência térmica por volume, que a combustão de resinosas. Do mesmo modo, se a densidade da madeira de resinosas for metade da densidade da madeira de folhosas, para obter igual potência térmica, a carga a aplicar terá de ter o dobro do volume em partículas carbonáceas (URL4; EPA ARB, 2005). A densidade da biomassa é um parâmetro importante, uma vez que influencia a velocidade de decomposição térmica da biomassa. Na Tabela 2.4 constam valores estimados para a massa específica média dos cinco tipos de madeira empregues neste estudo.

Tabela 2.4 – Densidade de cinco tipos de madeira (URL8; Santos & Santos, 1995; Salazar *et al.*, 1998).

	Sobreiro	Pinheiro bravo	Azinheira	Carvalho negral	Eucalipto
Densidade média (kg/m ³)	750	565	900	775	750

A madeira das folhosas é mais densa, no entanto existem variações na densidade de alguns exemplares, designadamente do género *Populus* (Choupo), no qual a madeira de algumas espécies possui densidade inferior à maioria dos tipos de madeira de resinosas (Ferreira, 2000).

A madeira de resinosas é utilizada preferencialmente como matéria-prima para actividades de marcenaria, construção e mobiliário, devido à sua maior disponibilidade e por ser mais económica que a madeira de folhosas, apesar da madeira de folhosas ostentar maior resistência (URL2; Biomass Energy Center, 2010).

O poder calorífico superior ou potencial térmico da biomassa depende do tipo de combustível, assim a madeira de resinosas tem genericamente um maior poder calorífico que a de folhosas. Em termos médios, surge uma gama entre 19 e 20 MJ/kg para a madeira de folhosas e uma gama entre 21 e 22 MJ/kg para a madeira de resinosas (URL2; URL4).

O poder calorífico da biomassa pode estar relacionado com o seu conteúdo em cinzas, assim, segundo Jenkins *et al.* (1998), madeiras com menos de 1 % em cinzas por norma apresentam um poder calorífico perto de 20 MJ/kg. Paralelamente, também o conteúdo em lenhina se relaciona estritamente com o poder calorífico da biomassa. Isto porque, o poder calorífico na lenhina tende a ser superior quando comparada com a celulose e hemicelulose, devido ao maior grau de oxidação destes dois compostos (Dermibas, 2005; Jenkins *et al.*, 1998).

Quanto menor o conteúdo em humidade na madeira maior o poder calorífico, portanto, após o abate a madeira possui uma capacidade de aquecimento inferior. Dado que, durante a combustão de madeira fresca parte da energia é dispendida na vaporização da água adsorvida na superfície externa e nos poros, há consequentemente uma menor eficiência de combustão. A combustão de madeira fresca é também responsável por maiores emissões de partículas, fumo e inqueimados (Fernandes, 2009).

A madeira de resinosas possui um poder calorífico superior ao da madeira de folhosas, conduzindo a uma velocidade de consumo de biomassa superior, podendo estar relacionado com a composição em resina, que contribui para um aumento em 10 a 20 % na energia libertada. Durante a combustão, o conteúdo em resina na biomassa de resinosas, promove uma maior emissão de fumo e material particulado (PM¹) (URL2; URL4).

Contudo, segundo Noves, *et al.* (1994) conteúdo elevado em resina, em espécies como o pinheiro bravo, conduz a um conteúdo superior em humidade e ao decréscimo no gradiente de

¹ Do Inglês *Particulate matter*.

permeabilidade. Além disso, o conteúdo em resina promove a dispersão da humidade, especialmente em partículas de biomassa com maior diâmetro. Dificultando o processo de secagem, isto porque durante este mecanismo a resina migra para o exterior da madeira, cristalizando, formando assim uma camada impermeabilizadora (Noves, *et al.*, 1994).

A madeira fresca tem um conteúdo em humidade compreendido entre 40 a 60 % (Loução, 2008). A secagem da madeira deve ter uma duração mínima entre 6 a 12 meses após o corte. As resinosas secam mais lentamente do que as folhosas, devido ao seu conteúdo em resina, e o processo de secagem pode exceder 1 ano. Por definição, a madeira após o processo de secagem deverá possuir 20 % de humidade. Este processo de secagem é mais acelerado em câmara com circulação de ar, como demonstrado na Figura 2.6 (EPA ARB, 2005).



Figura 2.6 – Diferentes disposições de madeira para secagem, em câmara com ventilação de ar natural (EPA ARB, 2005; Biomass Energy Center, 2010).

A madeira de folhosas é seleccionada preferencialmente como combustível em fogão a madeira, uma vez que geralmente possui um menor conteúdo em humidade, maior densidade, portanto sendo consumida a uma velocidade inferior, contrariamente à madeira de resinosas. Apesar de apresentarem o mesmo índice de energia, em massa, a combustão de madeira de resinosas ocorre a uma velocidade superior e liberta maior quantidade de energia durante o primeiro período de combustão (URL3).

Segundo Johansson *et al.*, (2004) a composição química da madeira, *pellets* e briquetes é idêntica, no entanto, em termos do conteúdo em humidade verificam-se diferenças significativas, sendo aproximadamente 8 % em *pellets* e em briquetes e valores de 15 %, 26 % ou 38 % em madeira. O conteúdo em cinzas em *pellets* de casca de árvore é superior ao observado em *pellets* de madeira, além disso possuem um conteúdo superior em azoto.

2.2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DE UMA PARTÍCULA CARBONÁCEA

O processo de combustão, ou seja a decomposição térmica de uma partícula carbonácea compreende algumas fases, que ocorrem em simultâneo ou de forma sequencial, sendo o aquecimento e secagem, a pirólise (desvolatilização), a gasificação, a combustão dos voláteis, a combustão do carbonizado, a fragmentação e a abrasão. As partículas de biomassa ao sofrerem estes processos térmicos dão origem a um combustível com características e composição diferentes (Tarelho, 2008; Ndiema *et al.*, 1998).

Na Figura 2.7 apresentam-se as fases genéricas do processo de decomposição térmica da biomassa lenhosa.

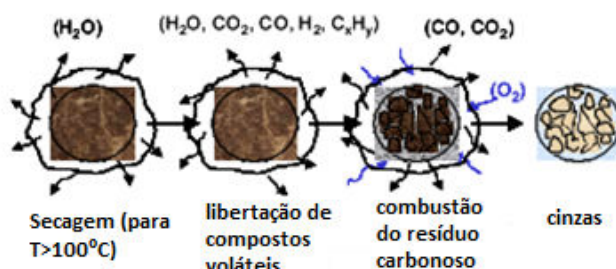
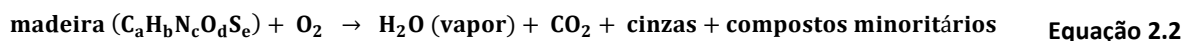


Figura 2.7 - Fases do processo de combustão de uma partícula carbonácea (adaptado Abreu, 2009).

A quantidade máxima de energia é obtida pela reacção ideal de combustão completa da biomassa lenhosa (Equação 2.2). No entanto, em termos práticos e reais apenas se consegue obter uma aproximação por aperfeiçoamento das condições de combustão e uma progressão no aprovisionamento do combustível na câmara de combustão. Assim, é importante melhorar o ambiente na câmara de combustão para aumentar a conversão total dos reagentes em produtos evitando a emissão de compostos inqueimados, como monóxido de carbono, que resultam da combustão incompleta (Dias, 2002; Ndiema *et al.*, 1998). Uma temperatura baixa na câmara de combustão, uma insuficiente mistura ar-combustível e um curto tempo de residência contribuem para a formação de compostos inqueimados (Werther *et al.*, 2000).



A partícula carbonácea ao ser introduzida no sistema de combustão atinge temperaturas relativamente próximas da temperatura no interior da câmara de combustão, razoavelmente entre 300 a 800 °C, inicialmente a superfície da partícula recebe calor por radiação e convecção, o seu interior recebe energia transmitida por condução e à medida que vai aquecendo vai perdendo humidade por evaporação. O processo de secagem, durante a combustão, é iniciado quando a temperatura da partícula é superior a 100 °C. A mudança de fase da água contida no interior dos tecidos pode gerar fissuras suficientemente grandes para partir a partícula carbonácea. O processo de vaporização é endotérmico, portanto ocorre depleção de temperatura na presença de humidade. Deste modo, é importante efectuar secagem da biomassa antes de aplicá-la, sendo possível reduzir o conteúdo em humidade em 10 a 20 %, contribuindo para a melhoria da qualidade do processo de combustão (URL5; Tarelho, 2008; Olsson, 2006; Abreu, 2006).

Um conteúdo em humidade elevado além de promover a diminuição da eficiência de combustão contribui para o aumento da emissão de material particulado. Por outro lado, se o conteúdo em humidade do combustível for muito baixo, atinge-se uma taxa de combustão elevada, que impulsiona a ocorrência de limitações da concentração em O₂ conduzindo a um aumento da formação de fumo e material particulado (Houck & Eagle, 2007; Fernandes, 2009).

Em suma, o conteúdo em humidade pode causar problemas no período de ignição do processo de combustão, pois influencia não só o poder calorífico, como também a eficiência de combustão e a temperatura na câmara de combustão (Jenkins *et al.*, 1998; Dermibas, 2005). Quando o ar aquecido é misturado com o ar admitido à câmara de combustão, expande e absorve a humidade do ar, resultando na desumidificação, contribuindo para a diminuição da temperatura na câmara de combustão (Whitman *et al.*, 2000).

A pirólise consiste na decomposição térmica do material orgânico na ausência de fornecimento exterior de oxigénio (O₂), produzindo produtos como carbonizado, hidrocarbonetos pesados (designados por alcatrões), CO₂, monóxido de carbono (CO), hidrogénio (H₂) e hidrocarbonetos leves (HC), dos quais metano (CH₄). A libertação de gases voláteis aumenta com a taxa de aquecimento e a libertação dos voláteis resulta da decomposição térmica dos componentes estruturais da madeira (hemicelulose, celulose e lenhina) (Tarelho, 2008; Dermibas, 2005). A decomposição da hemicelulose ocorre para temperaturas entre os 200 e 260 °C, da celulose entre 240 e 350 °C e da lenhina entre 280 e 500 °C (Olsson, 2006).

A taxa de volatilização é influenciada pela temperatura, taxa de aquecimento, tempo de residência, pressão, dimensão das partículas carbonáceas e tipo de combustível (Abreu, 2009).

Com o aumento da temperatura de desvolatilização a concentração de CO_2 decresce, ao passo que as concentrações de CO e de H_2 aumentam. Assim durante o processo, no período de temperaturas mais elevadas os produtos da pirólise podem constituir 70 a 80 % dos gases totais emitidos (Tarelho, 2008). Um tempo de residência superior será responsável por uma maior taxa de desvolatilização, em resultado da exposição mais prolongada do combustível às elevadas temperaturas. Por outro lado, num ciclo de combustão iniciado a frio, ou cuja ignição é dificultada pela presença de temperaturas na câmara de combustão entre 100 °C e 200 °C, a pirolisação é mais nítida, emitindo compostos inqueimados (Abreu, 2009).

Quando a temperatura de combustão dos gases voláteis é atingida inicia-se a combustão e os gases voláteis são misturados com o ar de combustão a temperaturas na gama de 500 a 900 °C (Olsson, 2006). Da libertação dos compostos voláteis e do choque térmico resulta a fragmentação das partículas carbonáceas, aspecto importante na oxidação. Caso a oxidação não seja completa, resulta numa menor eficiência da conversão do carbono e na perda de energia térmica pelo arrastamento dos gases e PM na corrente gasosa de exaustão (Tarelho, 2008).

A combustão dos voláteis e do carbonizado envolve reacções de combustão secundária das espécies gasosas libertadas aquando da fase de pirólise, incluindo a oxidação do CO resultante da gasificação do carbonizado quer pelo O_2 quer pelo CO_2 . A combustão do carbonizado é um processo fundamental à optimização da combustão da biomassa, alterando continuamente tamanho, densidade, área superficial e estrutura dos poros do mesmo (Tarelho, 2008).

No entanto, no processo de combustão a qualidade do combustível é mais importante que o tipo de combustível. A densidade, o conteúdo em humidade e o conteúdo em cinzas e sua composição, são aspectos igualmente importantes na selecção do tipo de combustível. A qualidade do combustível tem interferência nas condições de combustão influenciando significativamente as emissões, principalmente de inqueimados e PM, independentemente da tecnologia de combustão empregue (Sippula *et al.*, 2007; Johansson *et al.*, 2004).

A combustão do resíduo carbonoso é a última etapa do processo de combustão da partícula sólida, processo latente durante o qual o carbonizado é gradualmente oxidado na gama de 700 a 1000 °C, sendo que cerca de 80 % do combustível é gasificado por meio da pirólise. O carbonizado representa apenas 20 % da massa total do combustível, mas possui quase metade da sua capacidade de produção de energia térmica. A energia produzida durante a combustão do resíduo carbonoso é suficiente para continuar a combustão do carbonizado e libertação de compostos voláteis. De forma a atingir a maximização da eficiência térmica é necessário ar suficiente, mistura

ar-combustível e tempo de residência adequados, assim como a presença de um baixo conteúdo de carbono nas cinzas (Olsson, 2006; Werther *et al.*, 2000; Simoneit, 2002).

O resíduo carbonoso é composto por carbono fixo e cinzas com baixo conteúdo em hidrogénio, oxigénio, azoto e enxofre. Possui normalmente fissuras em resultado da libertação de gases voláteis, que possibilitam a difusão de O_2 para o interior da partícula cooperando na oxidação do resíduo remanescente, pelo que a reacção de oxidação dá origem a CO no interior da partícula, contribuindo para a sua conversão em CO_2 (Abreu, 2009).

No geral, recorre-se ao controlo da potência térmica produzida pela limitação do caudal volumétrico de ar de combustão primário admitido, resultando no aumento das emissões de compostos inqueimados, a não ser que seja incorporado um sistema de admissão de ar de combustão secundário (Loo & koppijan (*editors*), 2008).

A combustão de *pellets* de cascas de árvores promove maiores emissões de partículas do que a combustão de *pellets* de madeira, pelo facto da casca possuir um maior conteúdo de cinzas que a madeira propriamente dita. Além disso, a combustão de *pellets* de casca de árvore permite uma maior emissão de óxidos de azoto (NO_x), dado que, possui na sua constituição um conteúdo em azoto superior (Johansson *et al.*, 2004).

A composição da madeira varia em função dos vários tipos de biomassa, especialmente em termos de compostos inorgânicos, que têm implicações ao nível da corrosão e obstrução dos equipamentos (Dermibas, 2005). Segundo Sippula *et al.* (2007) o conteúdo em metais alcalinos na biomassa encontra-se relacionado com as emissões de partículas finas. O conteúdo em sílica e enxofre, na presença de cloro, originam reacções indesejáveis como a formação de partículas submicrométricas em larga escala. O conteúdo em cloro contribui para o aumento da volatilização dos metais alcalinos e consequentemente enriquece as cinzas volantes. Por outro lado, existem estudos, que evidenciam que a presença de enxofre pode inibir a acção do cloro na formação de partículas. A composição e quantidade de cinzas podem conduzir a situações de corrosão das unidades de combustão, isto porque, a sua composição está relacionada com a composição mineral da biomassa e com as condições de combustão (Dermibas, 2005; Sippula *et al.*, 2007; Johansson *et al.*, 2003).

A presença destas incrustações, promovida por corrosão, implica determinados problemas como a redução da transferência de calor superficial, aumentando os problemas de erosão, minimizando o tempo de vida do equipamento. De modo complementar, existem outros compostos inorgânicos na biomassa, dos quais sódio e potássio, que atribuem às cinzas um ponto

de fusão baixo. Colaborando na incrustação de cinzas na canalização e sua corrosão, principalmente a elevadas temperaturas. As incrustações que se formam durante a combustão de biomassa são mais densas e de difícil remoção comparadas com as que se formam na combustão de carvão (Dermibas, 2005).

A combustão dos voláteis é normalmente um processo mais rápido que a oxidação do resíduo carbonoso, assim o ambiente desenvolvido na câmara de combustão tem uma elevada importância na conversão da madeira. A composição inorgânica da biomassa, desde metais alcalinos, sulfatos e cloretos, para além dos aspectos negativos, podem desempenhar a função de catalisadores da pirólise e das reacções de gasificação, influenciando positivamente a velocidade de reacção e por conseguinte a eficiência do equipamento (Dias, 2002).

Existe uma grande variabilidade no conteúdo de cinzas de diferentes tipos de madeira e geralmente todos os gases emitidos da combustão de biomassa, excepto o CO₂, relacionam-se com o conteúdo em cinzas. Alterações no conteúdo em cinza originam diferentes condições durante a combustão. Para um combustível com elevado conteúdo em cinzas, exige-se uma razão entre ar-combustível superior, contudo as temperaturas do ar de convecção forçado serão inferiores. Conclui-se que, quanto maior o conteúdo em cinzas, maior a emissão de CO, dependendo do tipo de biomassa combustível (Sippula *et al.*, 2007).

Baixas temperaturas na câmara de combustão correspondem a maiores emissões de CO e de outros inqueimados, por sua vez, a oxidação do CO diminui com o arrefecimento da atmosfera de combustão, portanto a emissão de CO depende da temperatura na câmara de combustão (Sippula *et al.*, 2007).

2.3 COMBUSTÃO DE BIOMASSA A NÍVEL DOMÉSTICO E EMISSÕES

Para compreender o processo de combustão de madeira é de extrema importância ter conhecimento da sua composição. No entanto, o processo de combustão é um pouco mais complexo que o dos combustíveis fósseis, porque a sua composição química varia em função do tipo de biomassa lenhosa (Dias, 2002).

Em geral, os queimadores mais antigos têm associado a si maiores emissões que os fogões modernos a madeira ou a *pellets*. O desempenho dos fogões pode ser obtido de duas formas, por um lado o fogão que aquece a divisão onde se encontra, por outro o fogão com aquecimento por

caldeira cujo fluido aquecido é circulado por um sistema canalizado que aquece as divisões adjacentes (Johansson *et al.*, 2004).

Os parâmetros mais importantes numa combustão são o poder calorífico, a temperatura de combustão, a energia de activação e o conteúdo em cinzas, dependentes do tipo de combustível, das características da instalação de combustão e do modo como se procede na ignição da combustão (Carvalho, 2010).

Segundo Nussbaumer *et al.* (2008) quando se inicia a combustão pelo topo da carga de madeira evita-se a emissão de cerca de 50 a 80 % das partículas inaláveis em relação à técnica convencional de combustão por baixo da carga (Figura 2.8).

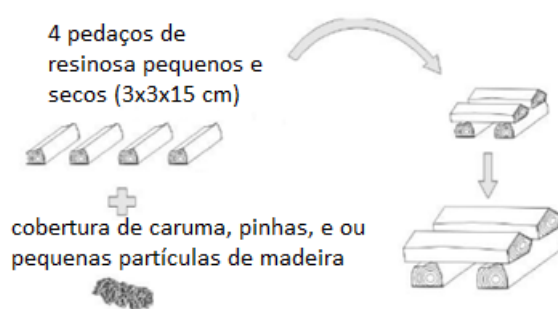


Figura 2.8 – Representação esquemática da ignição pelo topo da madeira e modo de disposição (adaptado Nussbaumer *et al.*, 2008).

A combustão da biomassa pode ser afectada por duas componentes principais, as características termoquímicas associadas à biomassa e a velocidade de combustão. Assim, um combustível deverá ter elevado poder calorífico, boa capacidade de secagem, baixa temperatura de ignição, baixa energia de activação, elevado conteúdo em voláteis e deve permitir uma elevada velocidade de combustão. A porosidade e tamanho da partícula, a condutividade térmica, a densidade e o calor específico são algumas das características físicas da biomassa com afectação no processo de combustão (Dias, 2002; Werther *et al.*, 2000).

Durante a combustão de briquetes de madeira são criadas melhores condições de mistura ar-combustível, comparativamente com a combustão de partículas de madeira, devido à sua dimensão. A existência de uma maior área de contacto nos briquetes promove a oxidação dos materiais voláteis orgânicos, fomentando a elevação da eficiência térmica (Schmidl *et al.*, 2008).

Segundo Ryu, *et al.* (2006) a velocidade de combustão aumenta com o aumento do caudal volumétrico de ar de combustão e diminui com a densidade do leito em combustão. Por outro lado, a taxa de pirólise e a eficiência são afectadas pela composição química da biomassa, conteúdo em cinzas, espessura, morfologia, densidade, conteúdo em humidade, temperatura, pressão e velocidade de combustão (Blasi, 2008). O conteúdo em cinzas é um parâmetro importante principalmente em queimadores a *pellets* (Sippula *et al.*, 2007).

O ar de combustão é mais denso que os gases de combustão, circulando nas zonas inferiores da câmara de combustão. O ar de combustão pode ser extraído do interior da habitação, principalmente em lareira, com caudal volumétrico de ar muito elevado constituindo um potencial foco de contaminação do ar interior por partículas e gases. Por outro lado, os fogões fechados podem também extrair ar de combustão do interior da habitação sem constituir problemas de contaminação, e existem também exemplares mais modernos, que admitem ar de combustão do exterior da habitação (URL5).

Se a carga, constituída por um pequeno conjunto de partículas carbonáceas, for disposta de forma cruzada e desorganizada, fomenta-se uma combustão rápida, porque o ar de combustão mistura-se mais eficazmente com o combustível, aumentando a superfície de actuação do fogo. Além disso, torna-se difícil atingir e manter uma temperatura elevada na câmara de combustão. Este tipo de combustão é mais usado na Primavera e no Outono, no qual a necessidade de aquecimento não é tão exigente como no Inverno (URL4; URL5) (Figura 2.9). Contudo, se dispusermos um conjunto de partículas de forma mais compacta, a combustão será mais lenta, uma vez que se torna mais difícil a penetração de O_2 nas zonas mais internas da carga, emitindo energia de uma forma gradual (Figura 2.9) (URL4; URL5).

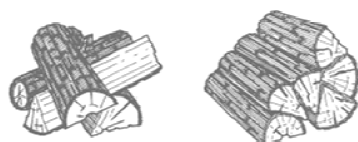


Figura 2.9 – Disposição para ciclos de combustão curtos e longos, respectivamente (URL5).

Na primeira imagem da Figura 2.10 ilustra-se a ignição do processo de combustão, na seguinte, a disposição de uma carga de partículas carbonáceas compactas no fundo da câmara de combustão para uma combustão prolongada. Na terceira imagem, a carga é colocada a meio da câmara de

combustão e as partículas são dispostas de forma desorganizada, para uma combustão de curta duração (URL5).

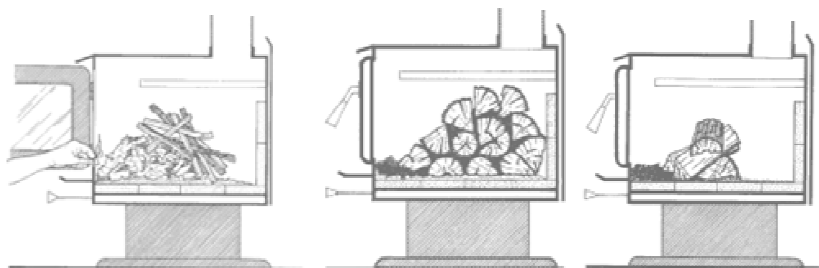


Figura 2.10 - Ignição, disposição para combustão prolongada e disposição para combustão curta (URL5).

A remoção dos resíduos florestais após o abate conduz a problemas, tais como a perda de nutrientes e alterações da acidificação do solo. As árvores removem cátions do solo ao longo do seu ciclo de vida, quando morrem estes retornam ao solo. Portanto, se o regresso dos nutrientes ao solo não for permitido, o solo torna-se gradualmente menos fértil e produtivo. Os nutrientes contidos na biomassa podem causar problemas durante a combustão implicando maiores emissões de NO_x e maior produção de cinzas (Olsson & Kjällstrand, 2004).

O uso de combustíveis derivados de resíduos de biomassa é preferível à combustão de biomassa lenhosa sob a forma de partículas de madeira, contribuindo para a diminuição dos impactos ao nível da floresta, no entanto, estes resíduos poderão conter grande conteúdo em nutrientes e contaminantes não desejados. Apesar de tudo, em equipamentos de combustão de biomassa de grande escala a valorização dos resíduos de limpeza de matas e florestas é uma mais-valia, necessitando contudo, *à posteriori*, tratamento avançado e purificação do efluente gasoso (Olsson & Kjällstrand, 2004).

Na Figura 2.11 encontra-se a rede de fluxos simplificada associada à exploração de biomassa para fins de combustão.

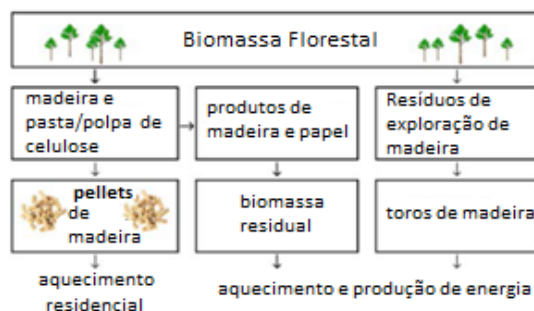


Figura 2.11 - Rede de fluxos da exploração de biomassa florestal (adaptado Olsson & Kjällstrand, 2004).

Segundo Koyuncu & Pinar (2007) a combustão de carvão emite menos fumo, consistindo em menores emissões de NO_x e SO_2 , sendo mais adequado que a combustão de biomassa lenhosa. Todavia, o equipamento de combustão a carvão não pode ser disposto em locais fechados, porque promove maiores emissões de inqueimados, como CO .

2.3.1 TECNOLOGIAS DE COMBUSTÃO DOMÉSTICA DE BIOMASSA

Em termos de equipamentos de combustão doméstica de biomassa é importante que estes respeitem condições adequadas para a redução das emissões poluentes e para maximização da eficiência energética. Existem diversas tecnologias de combustão, entre os quais tecnologias mais eficientes, como o fogão avançado de combustão de madeira.

Segundo Dias *et al.* (2004) em Portugal 3 % das casas possuem um sistema de aquecimento central, contudo 85 % destes são tecnologias de aquecimento incluindo fogões a madeira. Em apartamento os mais atractivos são os queimadores a gás, uma vez que os queimadores a *pellets* necessitam maior disponibilidade de espaço, sendo preferíveis para habitações particulares.

Segundo os Censos 2001, pelo Instituto Nacional de Estatística (INE), existiam à data 1 097 717 focos de lareiras, constituindo 32 % do total de alojamentos do país. Aveiro, Porto, Lisboa e Braga foram os distritos que declararam maior número de lareiras (Censos 2001, INE).

O conforto, a disponibilidade, o bem-estar e a estética proporcionados por um fogão a madeira podem justificar a preferência por estes sistemas, principalmente em zonas rurais, onde não há acesso a tecnologias de distribuição de calor como *District Heating*, nem a outras fontes de energia renovável (Carvalho, 2010). A tecnologia *District Heating* constitui um sistema moderno a nível do norte da Europa para o aquecimento doméstico, este sistema aproveita o calor produzido

por centrais Termoeléctricas para aquecimento de habitações na zona de influência da central de co-geração (Camacho, 2010).

2.3.1.1 FOGÕES DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA LENHOSA RESIDUAL

O fogão com escoamento de ar de combustão ascendente é o mais simples sistema de combustão de biomassa. Este equipamento está equipado com entrada de ar primário abaixo da grelha e de ar secundário acima da grelha. É um equipamento descontínuo, as cargas de madeira são adicionadas manualmente e as cinzas são recolhidas num reservatório inferior à grelha (Loo & Koppijan (*editors*), 2008; Johansson *et al.*, 2004). Possuem, vulgarmente, uma barreira física que obriga os gases de exaustão a permanecer por mais tempo na câmara de combustão, saindo perto do limite superior da retaguarda da câmara de combustão (Johansson *et al.*, 2004).

As emissões de hidrocarbonetos inqueimados neste tipo de equipamento podem ser superiores caso se opere a uma baixa velocidade de combustão, mais frequente no Outono e no Inverno. Este equipamento pode ser optimizado acoplando caldeira de aquecimento de água para o abastecimento doméstico, por transferência do calor contido nos gases de combustão. Associado à caldeira pode instalar-se também um sistema de aquecimento eléctrico, para que, a combustão de biomassa e o aquecimento eléctrico possam alternar entre si. Recorre-se a esta conjugação de sistemas, porque se revela mais flexível, dado que, em muitos países europeus a electricidade é mais barata no Verão, durante a noite e aos fins-de-semana no Inverno (Figura 2.13) (Loo & Koppijan (*editors*), 2008; Johansson *et al.*, 2004; Camacho, 2010).

No fogão de combustão de madeira com menores dimensões (com reservatório dispensador de combustível), a gasificação e combustão parcial ocorrem apenas em parte da biomassa do tanque de armazenamento de combustível. Isto porque, a combustão da biomassa é efectuada de forma faseada, através da adição de ar secundário de combustão. Vulgarmente é usado arejamento natural, no entanto, existem alguns modelos que recorrem a ventiladores de ar ou a escoamento de gás. A combustão final propriamente dita tem lugar na câmara de combustão e as cinzas são recolhidas no cinzeiro (Carvalho, 2010; Loo & Koppijan (*editors*), 2008). Este tipo de fogão pode recorrer a um sistema de controlo automatizado e à convecção forçada da distribuição de calor. Pode acoplar caldeira para aquecimento de água (Carvalho, 2010).

Neste equipamento, o combustível empregue consiste em pedaços e lascas de madeira, assim como briquetes e turfa. Os *pellets* não são usados devido ao facto de possuírem menor dimensão e uma densidade superior (Loo & Koppijan (*editors*), 2008). O investimento neste tipo de

equipamento é superior em 50 % ao de um fogão com escoamento de ar de combustão ascendente, além de serem equipamentos mais estáveis resultando em menores emissões (Loo & Koppijan (*editors*), 2008).

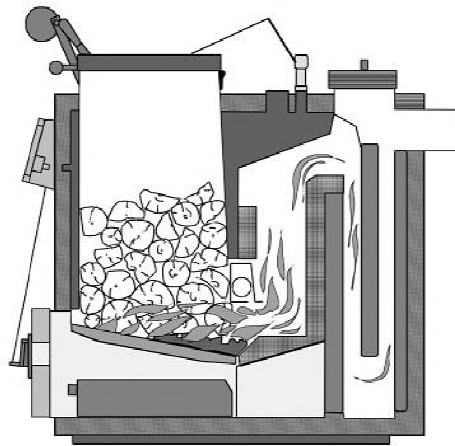


Figura 2.12 – Fogão de combustão de madeira com menores dimensões (Loo & Koppijan (*editors*), 2008).

Os vulgares fogões modernos, designados por fogões de escoamento de ar de combustão descendente, possuem uma zona de injeção forçada de ar secundário pela parte inferior, entrando ao nível da grelha ou na zona de combustão. As cargas de combustível são adicionadas manualmente. Além disso, a maior parte destes sistemas encontram-se conectados a uma caldeira para aquecimento de água, insulada com material cerâmico (Johansson *et al.*, 2004; Loo & Koppijan (*editors*), 2008). A combustão final tem lugar a elevadas temperaturas, e é necessário um sistema de fornecimento de ar, tanto de ar primário como secundário, dado que o ar de combustão possui uma resistência elevada (Loo & Koppijan (*editors*), 2008).

Para estes sistemas de combustão modernos os limites de emissão são muito restritos, além disso por implementar mais tecnologia e inovação é um sistema mais dispendioso que os fogões com escoamento de ar de combustão ascendente e que os fogões de madeira com menores dimensões (Figura 2.13) (Loo & Koppijan (*editors*), 2008).

Existem também queimadores múltiplos, encontrando-se adaptados para a combustão de vários combustíveis desde madeira, *pellets* e gásóleo, possuindo câmara de combustão com grelha para colocação de partículas carbonáceas e um alimentador de combustível adaptado tanto para gásóleo como para *pellets* (Figura 2.13).

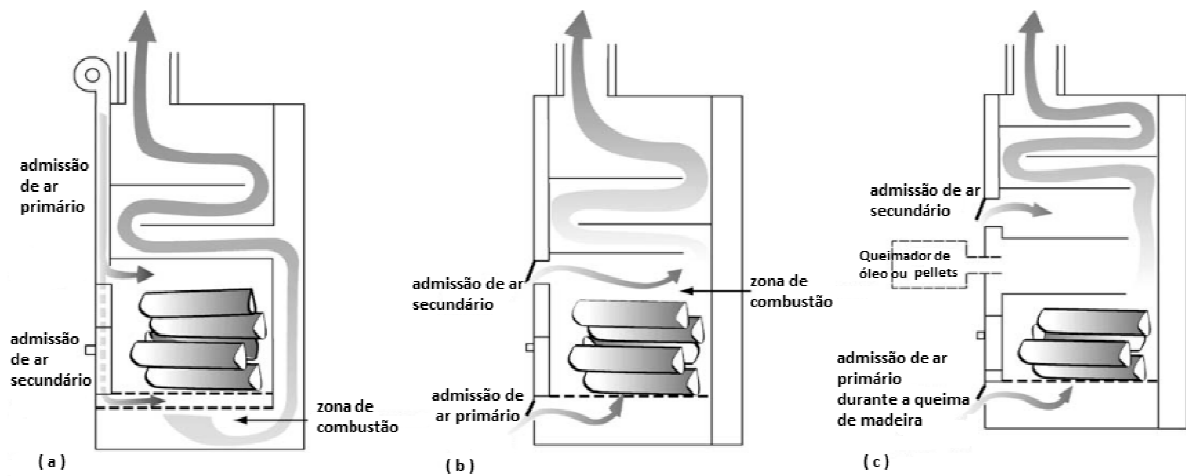


Figura 2.13 - Fogão com escoamento de ar de combustão descendente (a), fogão com escoamento de ar de combustão ascendente (b) e queimador de combustíveis múltiplos (madeira, *pellets* e gasóleo) (c), (adaptado de Johansson *et al.*, 2004).

Segundo alguns estudos, o uso de fogões catalíticos a madeira acarreta menores emissões. O catalisador possui um suporte, sendo um revestimento cerâmico constituído por vários alvéolos ou células (Figura 2.14), os quais serão atravessados pelo efluente gasoso. Estes alvéolos encontram-se impregnados de alumina, junto à qual, se encontra a parte activa do catalisador, sendo constituída por metais nobres, estáveis a temperaturas extremas, tais como paládio (Pd), platina (Pt) e cério (Ce), normalmente na forma de óxido de cério (CeO_2). O catalisador sofre degradação ao longo do tempo, necessitando de substituição após um período entre 1 a 2 anos, no entanto está dependente dos cuidados do utilizador, desaconselhando-se a combustão de madeiras tratadas e de resíduos domésticos, como plásticos (Ozil *et al.*, 2009; Whitman *et al.*, 2000; EPA – URL7).

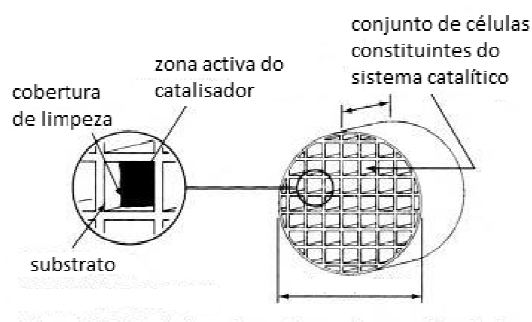


Figura 2.14 - Ilustração de um sistema catalítico (adaptado de Whitman *et al.*, 2000).

No período inicial da combustão e no período de combustão do carbonizado a eficiência do catalisador é reduzida, pois as espécies presentes no fumo encontram-se a baixas temperaturas conduzindo à intoxicação do elemento activo do catalisador, principalmente devido a compostos inorgânicos e compostos de sulfato. Por outro lado, os hidrocarbonetos pesados podem condensar junto do catalisador, desactivando-o. A fuligem ao depositar-se no catalisador pode colmatá-lo diminuindo a sua reactividade (Ozil *et al.*, 2009). O fogão com catalisador tem ainda, junto do elemento activo do catalisador uma válvula de *bypass*, que é aberta durante a recarga (Figura 2.15) (EPA – URL7).

Segundo Ozil *et al.* (2009) mesmo usando um catalisador, se a carga combustível for baixa, ou seja caso se atinjam apenas temperaturas a rondar os 120 °C, este não é activado, impossibilitando a oxidação do CO e dos compostos orgânicos voláteis (VOC²). Uma baixa carga combustível conduz ao aumento das emissões em comparação com uma carga normal. Assim, segundo este mesmo estudo, o factor de emissão de COV e CO é superior em 4 a 6 vezes para uma baixa carga combustível relativamente a uma carga normal.

Os fogões não catalíticos, como o próprio nome indica, não possuem catalisador, são fogões certificados pela *Environmental Protection Agency* (EPA) e usufruem de três características gerais condicionantes de bom ambiente na câmara de combustão, tais como, um bom material de isolamento, a existência de barreiras físicas que aumentam o tempo de residência do fumo e dos gases de combustão e a recirculação de ar de combustão pré-aquecido recolhido do interior da habitação, por aberturas na zona superior da câmara de combustão. Possui ainda um elevado abastecimento de ar de combustão, contribuindo para uma combustão mais completa (Figura

² Do inglês *Volatile Organic Compounds*.

2.15). O deflector e algumas componentes internas do fogão necessitam substituição, dado que ao longo do tempo sofrem deterioração pela exposição às elevadas temperaturas (EPA – URL7).

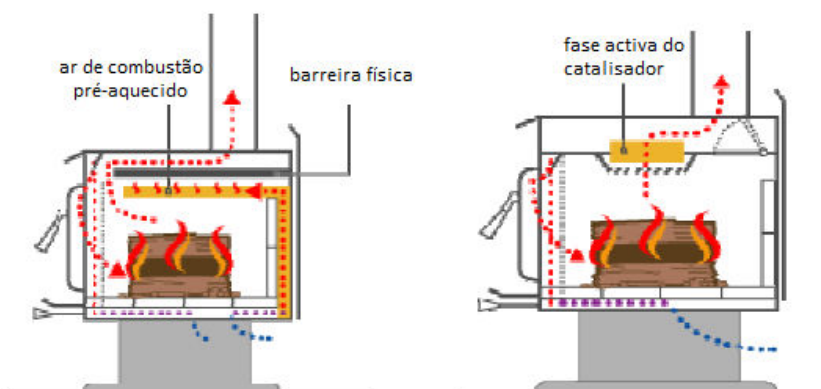


Figura 2.15 - Fogão não catalítico (à esquerda) e fogão catalítico (à direita) (adaptado EPA – URL7).

A criação de uma tecnologia avançada de combustão de madeira, desenvolvida no Canadá e nos Estados Unidos da América (EUA), traduziu-se num grande esforço em prol da redução da emissão proveniente de fogões a madeira, fazendo face ao cumprimento das regulamentações ambientais dos países envolvidos. Assim sendo, este novo sistema é mais seguro, eficiente e possui um custo efectivamente competitivo relativamente às lareiras. É praticável a implementação deste fogão no lugar onde se encontra assente uma lareira, convertendo-a (URL1).

O motivo do sucesso destes equipamentos tem que ver com a entrada de ar secundário que permite obter uma combustão mais completa, aumentando a eficiência de operação e reduzindo a emissão de gases de escape. Este sistema tem dois trajectos para o ar de combustão aquecido, o primeiro, de ar que é alimentado directamente na zona de combustão e o segundo é direccionado para a região acima da zona de combustão, arrastando e inflamando os produtos da combustão incompleta (URL1).

Este sistema possui uma janela piro-cerâmica que permite a transferência de calor para o interior da divisão por radiação infra-vermelha e o ar interior é recirculado na cavidade que envolve o fogão. Entra ar forçado por ventilador, a uma temperatura inferior, pela grelha na zona inferior do fogão e o ar quente é conduzido para o interior da divisão, na parte superior do fogão, permitindo assim a convecção do ar. Em algumas províncias do Canadá e dos EUA, é obrigatório o fornecimento de ar de combustão com origem no exterior da habitação. Deste modo, este

sistema permite a redução das emissões para o ar interior, além disso, a conduta de circulação de ar é tão complexa que dificilmente os gases de combustão conseguem utilizar esta via de escapatória (Figura 2.16) (URL1).

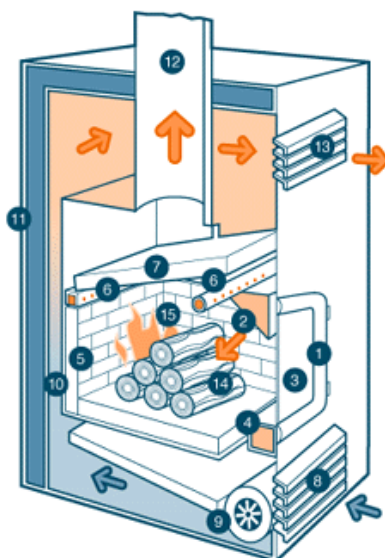


Figura 2.16 - Sistema avançado de combustão de biomassa (Legenda: 1- porta; 2- lavagem de ar aquecido para a porta de vidro; 3- vidro piro-cerâmico para transmissão de calor; 4- ar de combustão primário; 5- revestimento refractário para o isolamento da câmara de combustão; 6- ar secundário de combustão pré-aquecido; 7- deflector isolado; 8- entrada de frio por convecção; 9- velocidade variável de circulação na cavidade que envolve a câmara de combustão, por ventilador; 10- câmara de combustão convencional; 11- isolamento em relação à câmara exterior; 12- chaminé pré-fabricada; 13- saída de ar quente; 14- zona de combustão primária; 15- zona de combustão secundária) (adaptado de URL1).

Por norma, estes sistemas encontram-se junto duma parede com ligação ao exterior da habitação, portanto é necessária a aplicação de material deflector isolante de forma a evitar perdas de energia. Este sistema difere da lareira convencional, na medida em que é eficiente na troca de energia térmica. Alguns sistemas um pouco mais complexos podem também ter canalização de calor para divisões adjacentes da habitação, com auxílio de ventilador. Este tipo de sistema mais complexo é mais fácil de implementar em habitações modernas, durante a sua construção. No caso de falha na corrente eléctrica, o ventilador eléctrico deixa de funcionar, mas o calor do fogo continua a irradiar energia para o interior da habitação e decorre convecção natural (URL1).

Os requisitos em caudal volumétrico de ar de combustão, proveniente do interior da habitação, nestas instalações são relativamente baixos, rondando os 25,2 m³/h, sendo este o mínimo exigido para que a instalação funcione correctamente. Este caudal volumétrico de ar de combustão constitui cerca de um décimo do caudal exigido para uma lareira convencional, mas é o mesmo exigido em fornos de alta eficiência, de gás natural ou gasóleo. A eficiência destes equipamentos pode variar na gama de 50 a 70 %, mais ainda se forem instalados numa divisão aberta para outras partes da habitação, minimizando custos com outras formas de aquecimento (URL1).

O sistema de combustão de *pellets* funciona geralmente com sistema de alimentação automático, funcionando em contínuo, mas com fornecimento de calor intermitente, garantindo uma melhor combustão. Esta tecnologia pode conter sistema de controlo e optimização que evita a combustão incompleta principalmente durante as fases mais críticas, ignição e combustão do carbonizado (Carvalho, 2010). Os *pellets* são constituídos por resíduos de madeira, serrim e aparas, resultando de um processo de densificação, sendo um combustível limpo e de textura homogénea. Este combustível possui baixo conteúdo em nutrientes minerais, baixo conteúdo em humidade, por isso é preferencialmente empregue em equipamentos de combustão doméstica (Olsson & Kjällstrand, 2004).

No futuro esperam-se novos resíduos lenhosos para a conversão em *pellets*, dos quais, resíduos provenientes de culturas bioenergéticas, da agricultura, de lamas do tratamento de águas residuais e da fracção orgânica dos resíduos domésticos. Em todos os casos é importante promover estudos de combustão, devido às características específicas de cada tipo. E somente após a conclusão desses estudos se poderá negociar a colocação dos novos combustíveis no mercado (Olsson & Kjällstrand, 2004).

A composição dos *pellets* depende da matéria-prima que lhe deu origem, assim pretende-se que este seja um combustível homogéneo, com um baixo conteúdo em humidade, para que durante a combustão haja baixas emissões e uma alta eficiência térmica (Olsson, 2006). Um queimador a *pellets* emite menor quantidade de partículas que um fogão de combustão de madeira (Houck *et al.*, 1998).

Os queimadores a *pellets* são mais vantajosos em relação a queimadores de madeira uma vez que a área superficial do combustível é superior por unidade de combustível, resultando numa maior eficiência de combustão, dado que se promove uma maior mistura entre ar de combustão e combustível (Larson & Koenig, 1994).

Na Figura 2.17 é possível observar o esquema de um queimador a *pellets* e o pormenor de apresentação do combustível.



Figura 2.17 – Queimador de *pellets*, com dispensador de combustível.

O transporte do combustível peletizado é mais barato e conveniente, por isso os custos de transformação são compensados devido à densidade energética transportada. Outra vantagem dos *pellets* em relação à madeira não processada é a facilidade de utilização e manipulação pelo utilizador, pois são alimentados ao queimador de forma automatizada e não produzem tanta cinza (Olsson, 2006). Os *pellets* de madeira são um combustível mais barato que o gasóleo ou que a electricidade, além disso, se a matéria-prima for autóctone irão contribuir para a criação de mais emprego na região de produção (Olsson, 2006).

O uso de *pellets* é similar ao uso de combustíveis fósseis em termos de comodidades de utilização, porém em termos de viabilidade compensa, uma vez que o seu preço não é tão inconstante como no caso do gasóleo (Sá, 2009). Comparativamente com os queimadores a gasóleo, os queimadores de *pellets* exigem uma maior área de armazenamento, regulação do caudal e a remoção regular de cinzas do cinzeiro (Olsson, 2006).

O desenvolvimento dos queimadores de madeira e *pellets* proporcionou avanços nos dispositivos de combustão conduzindo à melhoria da eficiência térmica e à diminuição das emissões (Johansson *et al.*, 2004).

2.3.2 EMISSÃO DE POLUENTES GASOSOS RESULTANTES DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

A combustão doméstica de madeira tem uma contribuição significativa para a massa de material particulado, em zonas urbanas e rurais europeias, especialmente no Inverno. Podendo variar entre 50 a 80 %, uma vez que nesta época a combustão de madeira é a principal fonte empregue no aquecimento (Puxbaum *et al.*, 2007; Gaeggeler *et al.*, 2008).

Estima-se que em Portugal, por ano, sejam consumidas 390 Mton de madeira em lareiras, esta combustão conduz à libertação de compostos tóxicos poluentes em elevadas concentrações que perturbam a química da atmosfera (Gonçalves *et al.*, 2010). A combustão doméstica contribui com 18 % para as emissões de material particulado, sendo a madeira o combustível mais usado contribuindo com 98 %. As zonas costeiras são zonas de maior densidade populacional e também por esse motivo são representativas de um maior número de aplicações de combustão de biomassa. O norte e o centro são zonas onde se registam níveis mais elevados de partículas em resultado da combustão doméstica de madeira (Borrego *et al.*, 2010).

Existem alguns factores que influenciam a emissões de partículas e de outros poluentes, dos quais o tipo de combustível, portanto a sua composição, a estrutura do equipamento de combustão, a admissão de oxigénio (caudal de ar de combustão), o conteúdo em humidade e ainda o ambiente de combustão (Borrego *et al.*, 2010; Schmidl *et al.*, 2008; Koyuncu & Pinar, 2006; Dermibas, 2005). A quantidade de ar requerido depende da composição química do combustível (Dermibas, 2005). Segundo Schmidl *et al* (2008) o equipamento de combustão tem uma influência mais significativa na combustão, que a configuração do fluxo de ar admitido à câmara de combustão.

No entanto, segundo Fernandes (2009) o caudal volumétrico de ar admitido à câmara de combustão pode ter influência nas emissões. No caso do caudal de ar de combustão existe uma grande discrepância entre fogão e lareira, sendo que o caudal volumétrico de ar na lareira é superior cerca de 5 a 6 vezes ao do fogão. Assim sendo, tem-se um caudal volumétrico médio de ar de combustão de 35 Nm³/h para o fogão e de 160 Nm³/h para lareira. De modo complementar, as temperaturas observadas em fogão apresentam valores superiores ao verificado em lareira.

No fogão as concentrações de CO e CO₂ são mais elevadas, devido às maiores restrições e controlo do caudal volumétrico de ar de combustão. Este facto explica-se pois no caso da lareira o caudal é mais diluído, uma vez que o excesso de ar é superior ao do fogão. A combustão de cerca de 2 kg de madeira, na lareira, apresentava uma duração inferior à decorrida no fogão, cerca de 1 hora a 1 hora e 30 minutos para o fogão e 45 minutos a 1 hora para a lareira (Fernandes, 2009).

Se for empregue uma carga de partículas carbonáceas de dimensões normais, contudo, ocupando mais de 50 % do volume de armazenamento disponível na câmara de combustão, as emissões podem aumentar num factor entre 5 e 10 (Klippel & Nussbaumer, 2007). A dimensão das partículas influencia a eficiência de combustão. Segundo Dias *et al.* (2004) foi testada a combustão de diferentes tipos de *pellets* com dimensões diferentes e verificou-se que a emissão de inqueimados foi superior para *pellets* de diâmetro médio e superior.

Por outro lado, caso a válvula de controlo de caudal volumétrico de ar de combustão se encontre fechada as emissões podem incrementar-se num factor de 10, resultando numa emissão de partículas superior a 5000 mg/m³ (Klippel & Nussbaumer, 2007).

Na combustão em lareira a emissão de espécies inorgânicas é superior à do fogão, explicada pelo facto da velocidade de combustão ser o dobro e pela inexistência de restrições de caudal de ar. A velocidade do gás é aproximadamente 20 vezes superior à observada em fogão e existe maior turbulência, condições de combustão mais vigorosas, levando a uma maior formação e acumulação de cinza, com maior conteúdo em compostos inorgânicos (Houck *et al.*, 1989).

Durante a combustão da madeira são libertadas cinzas e alguns gases nocivos para o ambiente, tais como CO₂, NO_x, CO e SO₂, este último em quantidades vestigiais, VOC, material particulado (dos quais PM₁₀ e PM_{2,5}), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAH³), carbono orgânico total (TOC⁴). Estes compostos necessitam de tratamento, podendo até no caso das cinzas, depois de recolhidas serem usadas como adubo agrícola (Cardoso, 2010; Johansson *et al.*, 2004).

Na ocorrência de combustão incompleta são emitidos compostos diferentes, dos quais grandes quantidades de inqueimados, desde CO, fuligem (constituída por carbono elementar), compostos orgânicos condensados e hidrocarbonetos aromáticos pesados, designados vulgarmente por alcatrões. Um tempo de residência curto, baixa temperatura de combustão ou insuficiente mistura ar-combustível são condições que conduzem à combustão incompleta e consequentemente ao aumento das emissões (Fernandes, 2009; Sippula *et al.*, 2007). Da combustão incompleta resulta também PM, que contém material orgânico, material sólido inqueimado e material inorgânico nas cinzas. As cinzas volantes são arrastadas pelos gases de exaustão e as cinzas escórias remanescem no cinzeiro. A emissão de partículas aumenta com o aumento de material particulado inqueimado (Johansson *et al.*, 2004).

³ Do Inglês *Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*.

⁴ Do Inglês *Total Organic Carbon*.

Existe uma relação entre as emissões de CO e TOC nos queimadores de madeira, de *pellets* e de gasóleo. A emissão de TOC é influenciada pela taxa de admissão de ar de combustão, tal como a emissão de CO, de COV (metano e não-metano) e de PAH (Johansson *et al.*, 2004).

O tipo de biomassa combustível determina o tipo de emissões e a sua maior ou menor perigosidade. Segundo Gonçalves *et al.* (2010), estudaram-se várias espécies de biomassa florestal típicas de Portugal, como o pinheiro bravo (*Pinus pinaster*), o sobreiro (*Quercus suber*), o eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e a acácia (*Acacia longifolia*), concluíram que a combustão de pinheiro bravo e de acácia, em base seca, produz uma menor emissão de material particulado, ao passo que o sobreiro detinha uma maior emissão, seguindo-se o eucalipto.

Em termos de emissão de carbono elementar (EC⁵) a combustão de pinheiro detém as maiores emissões, 37,1 % em massa de PM₁₀, ao passo que o sobreiro possui as menores emissões, cerca de 11,3 % em massa de PM₁₀. A emissão de carbono orgânico (OC⁶) nos gases de exaustão variou entre 19,7 % para a acácia e 42,8 % para o sobreiro. Em suma, foram estabelecidos razões OC/EC superiores para o sobreiro e inferiores para o pinheiro bravo. Por conseguinte estipularam-se razões médias de OC/EC, de 3,9 para madeira de resinosas e 7,9 para madeira de folhosas (Gonçalves *et al.*, 2010).

Segundo Oliveira (2008) deixar a biomassa na floresta, após o abate/ corte, é importante na medida em que possibilita a reciclagem de nutrientes para o solo, tendo ainda a vantagem de proporcionar uma primeira secagem. Pensa-se que este aspecto possa ser positivo em termos energéticos e económicos numa secagem industrial. O processo de lixiviação ao remover alguns nutrientes e sais contidos na biomassa, contribui para aumentar o desempenho ambiental da combustão, além de poder contribuir para uma menor emissão de poluentes. Por outro lado, a recolha de resíduos de vegetação e arbustos secos da floresta e a sua valorização contribui para a diminuição do risco de incêndio.

Os compostos não oxidados, como CO e hidrocarbonetos, são resultado de condições de combustão incompleta que pode ser evitada cumprindo boas práticas na combustão, tais como tempo de residência adequado (suficientemente longo), temperatura suficientemente elevada e boa mistura dos gases na câmara de combustão. Durante o período de combustão ineficiente, o incremento do excesso de ar de combustão conduz ao aumento da emissão de CO, portanto a

⁵ Do Inglês *Elementar carbon*.

⁶ Do Inglês *Organic carbon*.

concentração de O₂ não é um factor limitante na oxidação do CO nesta fase do processo de combustão. Por conseguinte, excessos de ar elevados colaboram para uma maior emissão de CO, na medida em que contribuem para a redução da temperatura no interior da câmara de combustão (Johansson *et al.*, 2004).

Segundo Johansson *et al.* (2004), na combustão de madeira em fogão, maiores concentrações de compostos reduzidos correspondem a menores concentrações de NO_x, e vice-versa.

2.3.3 TRAÇADORES QUÍMICOS DA COMBUSTÃO DE BIOMASSA LENHOSA

A nível de inventário de emissões de fogos florestais ou de combustão doméstica de biomassa, para o estudo e caracterização química das emissões de PM e de outros poluentes, é possível recorrer a traçadores químicos para distinguir entre emissão de resinosas e folhosas e ainda subtrair a interferência de outro tipo de fontes de emissão.

Um traçador de combustão de biomassa pode ser um composto orgânico ou inorgânico resultante da quebra de ligações nos compostos lenhinocelulósicos (celulose, lenhina e hemicelulose) durante a pirólise. Levoglucosano, manosano e galactosano são alguns dos muitos anidro-açúcares usados para assinalar a combustão de biomassa lenhosa, mas a eficácia dependerá do tipo de coberto vegetal. Gonçalves *et al.* (2010) realizou o cruzamento de diversos traçadores para uma melhor aferição da espécie em causa e até mesmo para permitir a distinção entre emissões de combustão de biomassa de emissões de fundo ou de poluição automóvel.

O levoglucosano⁷ é formado a partir da pirólise da celulose, sendo o composto maioritariamente emitido como resultado da combustão de biomassa lenhosa ou de qualquer material celulósico, sendo detectado no fumo, desempenhando a função de traçador geral. O manosano deriva da pirólise da hemicelulose e constitui o segundo anidro-açúcar mais abundante na biomassa lenhosa. O nível de levoglucosano tem tendência a baixar quanto menor for a quantidade de fumo emitida, sugerindo que para temperaturas mais elevadas o material volátil produzido durante a pirólise e gasificação seja convertido mais eficientemente, como tal, o conteúdo em anidro-açúcares detectado no fumo será mais baixo (Schmidl *et al.*, 2008; Fine, *et al.*, 2001). Destes, o manosano é o traçador que melhor distingue a combustão de madeira de folhosas e resinosas, uma vez que as resinosas contêm cerca de três vezes mais manosano do que as

⁷ Nomenclatura química do levoglucosano: 1,6-anidro-β-D-glucopirranose.

folhosas. Deste modo, são usadas frequentemente gamas para a razão levoglucosano/ manosano de 3,6 a 3,9 para madeira de resinosas e 14 a 15 para madeira de folhosas. Esta razão é um modo de aproximação mais fiável para a caracterização do fumo de combustão de biomassa (Gonçalves *et al.*, 2010; Schmidl *et al.*, 2008).

Segundo Gonçalves *et al.* (2010) em termos de emissões de PAH, o pinheiro bravo foi das espécies em estudo com maiores níveis de emissão, dos quais reteno, que é principalmente detectado na combustão de madeira de resinosas. O reteno resulta da decomposição térmica da resina, como tal, detectam-se níveis baixos no fumo de combustão de madeira de folhosas. Outros compostos usados na distinção entre combustão de madeira de folhosas e resinosas são os fenóis e os ácidos resinosos (Fine *et al.*, 2001).

Em Allen *et al.* (2009) num estudo realizado na Suécia, foi possível estimar os níveis de PAH em 13 habitações com aplicações de combustão de madeira, obtendo-se níveis 3 a 5 vezes superiores relativamente a habitações sem equipamentos de combustão de biomassa.

Em Gaeggeler *et al.* (2008) o rácio de concentrações CO/NO_x funciona como traçador na distinção entre emissões de tráfego de veículos automóveis e combustão de biomassa lenhosa. Conforme valores registados no verão de 1997 em Caldecott, na Suíça, observaram-se razões de 137 ppm/ppm para fogões antigos de combustão de madeira e razões entre 8,8 e 9,4 ppm/ppm para o tráfego automóvel.

Usualmente são usados valores de estudos anteriores, provenientes de outros continentes ou regiões, para caracterizar a combustão, originando diferenças consideráveis nos resultados. Este aspecto corrobora a ideia de que é necessário estabelecer perfis para cada região, uma vez que os biomas diferem bastante, portanto implicando novas espécies de biomassa, com diferentes composições e consequentemente emissões discordantes durante a sua combustão (Schmidl *et al.*, 2008).

2.3.4 MELHORIA DE DESEMPENHO: SUBSTITUIÇÃO DE FOGÕES ANTIGOS POR MODERNOS

Segundo Allen *et al.* (2009) hipoteticamente a substituição de um fogão antigo por um fogão mais recente e inovador, poderá trazer benefícios ao nível da qualidade do ar interior, primeiro reduzindo as emissões para o ar exterior contribuindo para a diminuição das concentrações no ar interior, especialmente em habitações com menor eficiência térmica.

Segundo a Agência de Protecção do Ambiente dos Estados Unidos (US-EPA⁸) a substituição das tradicionais lareiras por fogões fechados certificados resultou numa redução de 90 % nas emissões de PM, como tal numa melhoria da qualidade do ar interior e exterior (Borrego *et al.*, 2010). Contudo, segundo Allen *et al.* (2009), a troca de um fogão antigo por um certificado a madeira não reduz significativamente as concentrações de PM_{2,5} no ar interior. Sendo que, existem evidências indirectas de que as concentrações de PM_{2,5} no ar interior são resultado de outras fontes que não a combustão doméstica. Isto porque, existe uma boa correlação, no ar exterior, entre a concentração de PM_{2,5} e a concentração de levoglucosano, contudo, no ar interior essa relação não é mantida permitindo admitir que existem outras fontes de emissão de PM_{2,5}.

A emissão de poluentes pode variar em função da tecnologia empregue, assim a emissão de PM pode ser 50 vezes superior num fogão a madeira ou lareira não controlados. De igual modo, as emissões de CO num fogão podem variar entre 18 e 180 g CO/ kg de madeira. Por estes motivos, é realmente importante ter em atenção o tipo de tecnologia de combustão doméstica, principalmente porque a combustão incompleta não afecta só a qualidade do ar ambiente e qualidade do ar ambiente interior, como também tem grande influência no aquecimento global, podendo envolver gases com efeito de estufa e ainda severos efeitos na saúde (Johansson *et al.*, 2004).

A distinção das emissões que resultam de cada tipo de equipamento de combustão de madeira ou *pellets* é necessária para assegurar um uso sustentável dos recursos biocombustíveis. Johansson *et al.* (2004) tiveram em conta diferentes parâmetros relevantes em termos de comparação de emissões gasosas e de PM em diferentes tipos de queimadores de biomassa e de *pellets*. Neste estudo consideraram a idade, o design, a existência ou não de conexão a uma caldeira de acumulação de calor, o tipo de biocombustível e a sua qualidade, em termos de composição química. O objectivo era diferenciar os fogões antigos dos modernos em termos de emissões, assim como distinguir emissões da combustão de diferentes espécies combustíveis.

Os fogões a madeira podem acoplar uma caldeira para aquecimento de água, a existência deste tanque de armazenamento de energia permite a obtenção de condições óptimas de combustão, tais como menores emissões e eficiências superiores. Além do uso de caldeira, as emissões podem ser minimizadas com um comportamento de combustão favorável ou com uma nova

⁸ Do Inglês *Environment Protection Agency of de United States*

tecnologia de combustão. Por outro lado, relativamente aos queimadores a *pellets*, estes possuem uma operação intermitente onde a influência de um reservatório de retenção de calor não é tão significativa (Johansson *et al.*, 2004).

Obviamente os dispositivos de combustão mais antigos promovem maiores emissões de partículas e compostos não oxidados que os queimadores modernos. Segundo Johansson *et al.* (2004) os queimadores a gásóleo são o tipo de equipamento que promove menores emissões. Em termos de desempenho e emissões, os queimadores a *pellets* e a gásóleo assemelham-se mais que os queimadores de madeira modernos. Por outro lado, a combustão de madeira, com baixo conteúdo em humidade, em fogão moderno com caldeira de armazenamento de calor, permite emissões idênticas às produzidas em queimadores de *pellets* (Johansson *et al.*, 2004).

Os fogões antigos além de, usufruírem de tecnologia mais rudimentar e de práticas operacionais menos eficientes, são sistemas no qual são dispostas grandes cargas de combustível, o que contribui para menores eficiências de combustão, com libertação de grandes quantidades de inqueimados e fuligem (Tissari *et al.*, 2007). Todavia, em fogão antigo com caldeira para aquecimento de água, na combustão de grandes cargas, a emissão de compostos não oxidados e partículas pode reduzir-se em 20 vezes. Comparando fogão recente com fogão antigo, se lhes for aplicado a ambos uma caldeira de retenção de calor, as emissões de partículas do recente podem ser apenas 30 % das emitidas pelo antigo (Johansson *et al.*, 2004).

Em termos de compostos emitidos durante a combustão é possível referir que o composto orgânico volátil mais frequente nos gases de escape é o metano, provavelmente por possui menor taxa de oxidação comparativamente com outros hidrocarbonetos. Comparando a emissão de CH₄ entre os diversos dispositivos de combustão é possível constatar que a fracção de CH₄, como soma de metano e compostos orgânicos voláteis não-metano (NMCOV⁹), é de 50 % em massa para os queimadores a gásóleo, 20 a 40 % para os queimadores de *pellets*, 30 a 60 % para fogões de madeira recentes e 60 a 70 % para fogões de madeira antigos (Johansson *et al.*, 2004).

É de extrema importância a redução da emissão de CH₄ pelo facto de ser um gás com um potencial de efeito de estufa 60 vezes superior ao do CO₂ e estável na atmosfera, embora menos que o CO₂. Apesar das elevadas emissões de inqueimados e partículas pelos fogões modernos a madeira, comparando com os queimadores a gásóleo, os primeiros são uma opção de aquecimento mais ecológica e sustentável, além disso têm uma menor contribuição para o efeito

⁹ Do inglês *Non methanic volatile compounds*.

de estufa, dado que os queimadores domésticos a gasóleo são responsáveis pela emissão de CO₂ fóssil (Johansson *et al.*, 2004).

Segundo Johansson *et al.* (2004) a emissão de CH₄ pelos queimadores a gasóleo foi de 74000 mg CO₂/MJ, ao passo que para o pior fogão a madeira (tipo antigo) alcançou 4800 mg CO₂/MJ, o que representa 100000 mg CO₂ equivalente/MJ. Porém, considerando que o rendimento dos fogões de madeira, do tipo antigo, corresponde a 50 % e o dos queimadores a gasóleo ronda os 90 %, foi possível aferir que a utilização de fogão antigo pode contribuir com 2 vezes mais impacto que a de um queimador a gasóleo, além das maiores emissões de material não oxidado e particulado.

A substituição de um fogão a madeira antigo por um fogão moderno com caldeira de armazenamento de energia, ou por um queimador de *pellets* permite uma redução das emissões de CH₄ numa gama de 8000 a 9000 vezes, além disso possuem maior eficiência. A instalação de uma caldeira para retenção de calor num fogão a madeira antigo contribui para a diminuição das emissões de CH₄ em 7 vezes e das emissões de PM em 21 vezes. Um resultado semelhante pode ser obtido aplicando cargas de combustível menores (Johansson *et al.*, 2004).

2.3.5 EFEITOS NA SAÚDE

Durante a combustão de madeira é emitido um conjunto de compostos poluentes com efeitos na saúde humana e na qualidade do ar. A exposição a estes compostos, em especial às PM, pode resultar em asma, entre outras doenças do foro respiratório, ocular e cardiovascular, diminuição da actividade pulmonar, mas também morte precoce (Carvalho, 2010; Arbex *et al.*, 2004).

Segundo Arbex *et al.* (2004) os efeitos sobre a saúde decorrentes da exposição, por longos períodos, ao fumo da combustão de biomassa, em ambiente fechado, estão associados a infecções respiratórias agudas em crianças, doença pulmonar obstrutiva crónica, pneumoconiose¹⁰, cataratas e cegueira, tuberculose pulmonar e efeitos nefastos na gestação. A exposição a estes poluentes ocorre principalmente nos meses mais frios e em países em desenvolvimento.

A Organização Mundial de Saúde (OMS) refere que a intensidade e gravidade dos efeitos dependem de determinados factores, tais como as características dos poluentes, as características da população exposta, a exposição e a susceptibilidade do indivíduo exposto. O

¹⁰ É uma doença pulmonar restritiva causada pela inalação de poeiras, como sílica de poeira fina.

fumo libertado em meios abertos possui efeitos indirectos ao nível da saúde, como a redução da fotossíntese, diminuindo as culturas agrícolas, o aumento dos microorganismos patogénicos no aerossol atmosférico e na água, além do aumento de larvas de mosquitos vectores de doenças (Arbex *et al.*, 2004).

A título de exemplo, a Austrália possui um sistema de obrigatoriedade na compra de equipamentos de combustão registados e aceites pela norma australiana, sob pena de multa caso os equipamentos não cumpram os requisitos da mesma (DEC, 2009). Na Europa os fogões a biomassa são certificados segundo as normas EN-13240 (*room heaters*) ou EN-13229 (*insert appliances and open fireplaces*), embora no geral não haja aplicação de lei por punição (Carvalho, 2010).

Segundo o *National Environment Research Institute – Arthus University* (NERI) em áreas com elevada densidade de fogões de madeira a contribuição em termos de emissão média anual de partículas é de cerca de $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, para condições meteorológicas normais. Em zonas rurais esta fonte de poluição por partículas está estimada em 10 a 20 %, segundo médias anuais. O material particulado respirável, ou seja as partículas de dimensão igual ou inferior a $2,5 \mu\text{m}$, contêm PAH que são potencialmente cancerígenos, assim como o fumo do tabaco (URL6). Na Figura 2.18 consta a gama de diâmetros de PM, desde $10 \mu\text{m}$ a partículas inferiores a $0,1 \mu\text{m}$ (ultrafinas), assim como o respectivo grau de penetração nos tecidos do sistema respiratório humano. Estas partículas ultrafinas chegam mesmo a penetrar nos alvéolos pulmonares interferindo com as trocas gasosas, tendo um efeito mais pernicioso.

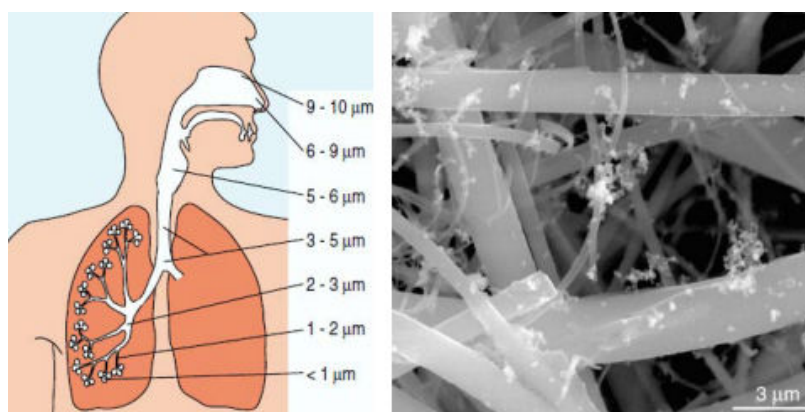


Figura 2.18 - Penetração de material particulado nos tecidos do sistema respiratório (Carvalho, 2010).

A inalação de CO não é perceptível por ser um gás inodoro, além disso, ao nível das trocas gasosas no sistema respiratório, este possui uma maior afinidade para a hemoglobina do sangue, comparativamente ao O₂, podendo causar a morte num curto espaço de tempo, dependendo da dose exposta.

Segundo Kipplel & Nussbaumer (2007) a combustão incompleta de biomassa lenhosa pode envolver maior toxicidade e potencial cancerígeno que a fuligem de gasóleo. Por outro lado, a realização de uma combustão quase completa da madeira em caldeiras automatizadas pode resultar numa redução da toxicidade em 5 vezes, quando comparada com a fuligem resultante de um queimador a gasóleo (Larson & Koenig, 1994).

Actualmente, os limites de emissão apenas consideram a massa de partículas emitidas e a sua relevância ao nível da saúde, não se dedicando à identificação da toxicidade das partículas emitidas durante um processo de combustão pouco eficiente, por este motivo parecem subestimar as emissões provenientes de lareiras ou fogões. A toxicidade dos poluentes emitidos pode ser estudada através de estudos de toxicologia animal, estudos de controlo humano e epidemiologia (Larson & Koenig, 1994).

A qualidade do ar interior é de extrema importância uma vez que as pessoas passam a maior parte do tempo dentro de casa, especialmente durante a noite. A exposição da população ao ar interior ocorre não da emissão proveniente de instalações de combustão doméstica e de outros focos de emissão, como também da infiltração proveniente do ar exterior (Larson & Koenig, 1994).

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada a selecção e modo de preparação do combustível, descrição das componentes principais da infra-estrutura experimental, incluindo mais pormenorizadamente o fogão, o sistema de amostragem e análise gasosa, o sensor de carga e o sensor de fluxo mássico de ar de combustão, assim como a metodologia experimental.

3.1 SELECÇÃO E PREPARAÇÃO DA BIOMASSA COMBUSTÍVEL

A biomassa lenhosa combustível apresenta-se sob a forma de partículas carbonáceas, de dimensões típicas entre 25 a 35 cm de comprimento, dimensionadas para o tamanho da grelha de combustão. Foram seleccionados cinco tipos de biomassa lenhosa, quatro deles pertencem à classe das folhosas (sobreiro, carvalho negral, azinheira e eucalipto) e um pertence à classe das resinosas (pinheiro bravo). As espécies seleccionadas são as mais abundantes em território nacional e por esse motivo, constituem as espécies com maior disponibilidade de aplicação em equipamentos de combustão doméstica.



Figura 3.1- Tipos de biomassa lenhosa utilizadas no estudo (adaptado de Torres, 2010).

3.2 INFRA-ESTRUTURA EXPERIMENTAL

Neste trabalho efectuaram-se experiências de combustão com partículas carbonáceas dos diferentes tipos de madeira, em fogão fechado, tendo como finalidade a produção de ar quente.

A instalação experimental encontra-se no departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro, acoplando um sistema de controlo e medição contínua.

A instalação experimental é representada esquematicamente na Figura 3.2, sendo constituída por vários componentes, entre os quais estão incluídos:

- Fogão doméstico;
- Condução de exaustão gasosa (chaminé);
- Sensor de caudal volumétrico de ar de combustão;
- Sensor de carga de biomassa na grelha;
- Sistema de aquisição de dados;
- Sistema de amostragem e caracterização gasosa;
- Unidade de condensadores de gás;
- Termopares tipo K.

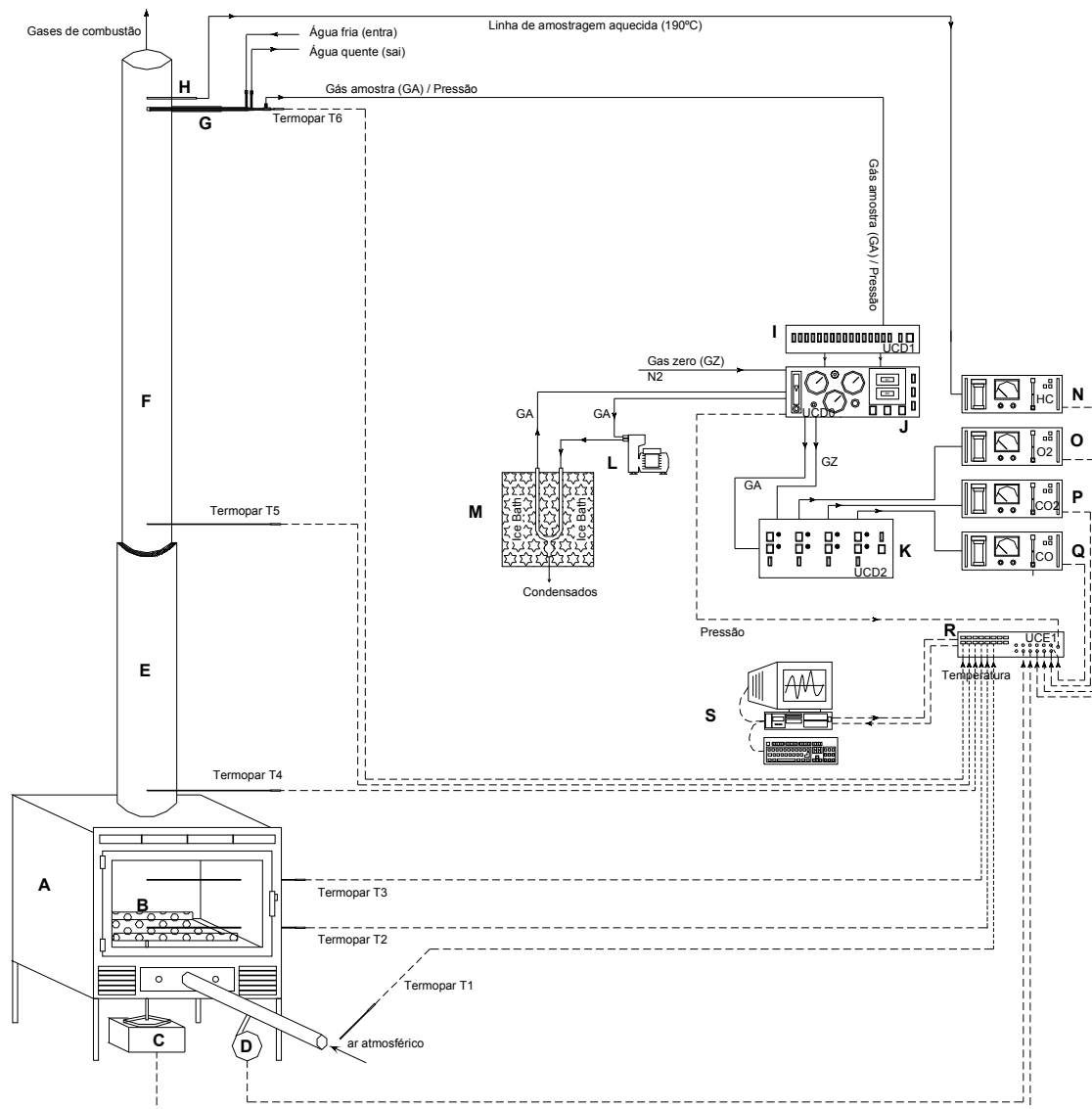


Figura 3.2 – Representação esquemática da instalação experimental (Legenda: A- fogão; B- grelha; C- Sensor de carga (para o registo de massas); D- Sensor de caudal volumétrico de ar; E- Isolamento térmico da conduta de exaustão; F- Conduta de exaustão (chaminé); G- Arrefecimento da sonda por sistema a água de modo que o gás possa ir ao sistema de amostragem; H- Linha de amostragem aquecida; I, J e K- Comandos e unidades de distribuição do gás (UCD0, UCD1, UCD2); L- Bomba do gás de amostragem; M- Unidade de condensadores do gás para remoção de humidade; N, O, P e Q- Analisadores de gás automáticos (on-line) (HC, CO₂, O₂, CO); R- Unidade de comando electrónico (UCE1); S- Sistema de aquisição de dados e sistema de controlo; T1- Temperatura do ar que entra na câmara de combustão; T2- Temperatura na grelha; T3- Temperatura acima da zona de combustão; T4- Temperatura à saída da câmara de combustão; T5- Temperatura na conduta de exaustão, à saída da conduta isolada termicamente (início da chaminé propriamente dita); T6- Temperatura dos gases de exaustão antes da saída da chaminé (sonda de amostragem gasosa)).

3.2.1 FOGÃO E CONDUTA DE EXAUSTÃO DE GASES

O fogão utilizado é da marca Solzaima (modelo Sahara), semelhante ao que é utilizado em equipamentos de combustão doméstica e possui recuperador de calor (Figura 3.3). Este equipamento possui classe de eficiência nível 1, pelo que possui uma eficiência de conversão energética de 74 %. A potência útil do equipamento varia na gama 9,8 a 18,2 kW_{th} (Pinho², 2010).

Possui uma célula de carga ligada ao veio da grelha, para monitorizar a evolução de massa de biomassa na grelha e um sensor de fluxo mássico para monitorização contínua do caudal volumétrico de ar de combustão, como é possível observar no esquema da instalação experimental na Figura 3.2. Cada carga de biomassa é efectuada manualmente na grelha e as cinzas produzidas durante a combustão são recolhidas na gaveta localizada abaixo da grelha.



Figura 3.3 - Fogão no seu estado não operacional.

O fogão tem cerca de 70 cm de altura, 76 cm de comprimento e 45 cm de largura. A parte da frente do fogão é em ferro fundido e as restantes paredes em aço inoxidável. A câmara de combustão do fogão tem cerca de 34 cm de altura, 60 cm de comprimento e 37 cm de largura (Pinho², 2010). A evolução da temperatura é registada em contínuo utilizando termopares inseridos em aberturas próprias: junto à grelha, na zona acima da grelha (topo da câmara de combustão), no sistema de alimentação de ar de combustão e na zona de saída do ar de convecção forçado (na zona superior da câmara de combustão) (Figura 3.2).

A conduta de exaustão de gases apresenta cerca de 20 cm de diâmetro e cerca de 3,30 m de altura. Por questões de segurança até uma altura de cerca de 1,03 m esta encontra-se revestida

por material de isolamento e lã cerâmica (Pinho², 2010). Também ao longo da conduta de exaustão existem aberturas próprias para colocação de termopares, de forma perpendicular ao escoamento de gás, em três pontos estratégicos, como é possível observar na Figura 3.2.

3.2.2 SISTEMA DE AMOSTRAGEM E ANÁLISE DE GASES

O sistema de amostragem gasosa é composto por três analisadores automáticos, um conjunto de unidades de controlo e distribuição de gás (UCD's) e uma sonda de amostragem de gás junto à saída da conduta de exaustão (Figura 3.2).

O conjunto de analisadores automáticos de gás encontra-se ligado a um conjunto de unidades electropneumáticas de controlo e distribuição de gás-amostra e de gás-zero pelos analisadores. O sistema de recolha de gases encontra-se acoplado ao termopar T_6 . A amostra é arrefecida por sistema de recirculação de água e o conteúdo em água desta é removido por meio de um condensador, sendo posteriormente bombeada aos analisadores automáticos de gás (Figura 3.2, ponto G). O conjunto de analisadores automáticos é constituído por analisador de O_2 , em gases secos (paramagnético, modelo ADC 02-700 com um módulo Servomex) e pelo analisador de CO_2 e CO , em de gases secos (Infravermelho não dispersivo, Environnement, MIR 9000) (Figura 3.4).

A sonda de amostragem de gás efectua a recolha de hidrocarbonetos para a sua medição, esta é aquecida por intermédio de uma resistência eléctrica mantendo a temperatura da amostra em torno dos 190 °C, evitando a condensação de hidrocarbonetos e do vapor de água existente na amostra, minimizando o risco de dissolução de espécies químicas como HC, CO_2 e NO_2 (Figura 3.2, ponto H). A sonda aquecida possui dois filtros em cada extremidade, um filtro de partículas, na extremidade exterior, é arrefecido com gelo e o filtro de lã cerâmica na extremidade interior da sonda (dentro da conduta de exaustão) filtra partículas sólidas. No analisador de hidrocarbonetos obtém-se uma amostra gasosa sem humidade e sem material particulado. O analisador de hidrocarbonetos regista sob a forma de CH_4 , em gases húmidos (DYNA FID INC. – SE 310 Total Hydrocarbon Gas Analyzer) (Figura 3.4).



Figura 3.4 - Analisadores de gás, à esquerda o analisador de hidrocarbonetos e à direita os analisadores de CO₂, CO e O₂.

3.2.3 SENSOR DE CARGA

O sensor de carga (*DS Europe 535 QD – A5*) está posicionado por baixo da base de um veio de metal perpendicular à grelha, estando soldado à grelha, de modo semelhante ao esquematizado na Figura 3.2 (ponto C). A colocação do sensor de carga deve permitir o equilíbrio deste conjunto, para evitar problemas no registo de massas. O sensor de carga é um transdutor, estando ligado ao sistema de aquisição de dados por envio de sinais analógico em volts, sendo transformados em unidades de massa por via de uma recta de calibração. O sensor de carga permite assim efectuar a monitorização da massa de biomassa na grelha no decorrer das experiências de combustão.

3.2.4 SENSOR DE CAUDAL VOLUMÉTRICO DE AR DE COMBUSTÃO

O sensor de fluxo mássico (*Kurz, series 155 – Mass Flow Computer*) faz a aquisição do caudal volumétrico de ar de combustão alimentado à câmara de combustão. Este sistema está posicionado abaixo da grelha, perpendicularmente ao fogão, ao qual se encontra soldado de modo a evitar infiltrações de ar de combustão, conforme representado na Figura 3.2 (ponto D). Nas experiências de combustão a abertura do regulador de caudal era máxima originando uma combustão mais intensa.

3.3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Antes de iniciar cada experiência de combustão são realizadas algumas etapas, tais como a preparação e calibração do sistema de amostragem gasosa; a colocação e ajuste do sensor de carga; a colocação do sistema de admissão de ar de combustão e do sensor de caudal volumétrico de ar; a colocação de termopares nos pontos estratégicos; a preparação e colocação do condensador; a activação do sistema de recirculação de água; o ajuste das cargas às dimensões da grelha e o registo prévio da massa de cada carga (Figura 3.2).

A ignição das experiências de combustão não foi executada a frio, para tal efectuou-se um primeiro ciclo de combustão durante cerca de 1 a 2 horas. Foi realizado um segundo ciclo de combustão para obter o perfil de temperaturas em sete pontos da instalação experimental: na zona de admissão de ar de combustão, na grelha, acima da zona de combustão, junto à saída da câmara de combustão, à saída da conduta de ar de ventilação forçada, após a passagem na conduta de exaustão revestida com material de isolamento e à saída da conduta de gases de exaustão, segundo o descrito na Figura 3.2.

Posteriormente, foram realizados entre três a quatro ciclos de combustão consecutivos. A massa de cada carga de partículas carbonáceas está compreendida vulgarmente entre 1,8 e 2,0 kg, sendo constituída por cerca de três a quatro partículas carbonáceas. Cada carga foi pesada previamente para permitir, posteriormente, a determinação do consumo de biomassa num ciclo de combustão completo.

Durante as experiências de combustão é monitorizada a massa de biomassa na grelha, as temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão, o caudal volumétrico de ar de combustão e a concentração de gases de combustão à saída da conduta de exaustão (CO_2 , O_2 , CO e CH_4).

Após as experiências de combustão removem-se condensadores, sonda de amostragem gasosa e termopares, são também retirados o sensor de carga, o sistema de admissão de ar de combustão e o sensor de caudal volumétrico de ar de combustão, efectuando a manutenção e reservando para trabalhos futuros.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo apresenta a composição elementar e imediata dos vários tipos de madeira. Durante a combustão de cada carga de biomassa foi realizada a monitorização contínua de diferentes parâmetros, que incluem temperatura na câmara de combustão e ao longo da conduta de exaustão, caudal de ar de combustão, massa de combustível na grelha e composição dos gases de combustão à saída da conduta de exaustão. Foram determinados valores de eficiência de conversão energética e de potência útil do equipamento de combustão. Efectuou-se a comparação do desempenho do fogão na combustão dos diferentes tipos de biomassa, em particular entre folhosas e resinosas.

4.1 ANÁLISE IMEDIATA E ELEMENTAR DA BIOMASSA LENHOSA

Neste subcapítulo é apresentada a composição de cada amostra de madeira em estudo, incluindo a análise elementar, imediata e o poder calorífico. As amostras de serrim (Figura 4.1) requeridas para a determinação da composição elementar e imediata possuem espessura inferior a 1 mm.



Figura 4.1 – Amostras de serrim de sobreiro, carvalho negral, eucalipto e pinheiro bravo.

A determinação do conteúdo em humidade foi obtida segundo a norma CEN/TS 14774-3 de 2004. Em anexo encontra-se descrito o procedimento experimental e a equação usada na sua determinação, assim como os dados intermédios. O conteúdo em humidade é dado pela perda de massa após a secagem de cada amostra em estufa a 105 °C, até não se observar variação de massa. Pela Tabela 4.1 constata-se que genericamente o conteúdo em humidade médio não

difere muito entre os diversos tipos de madeira, contudo é superior nas amostras de sobreiro e pinheiro bravo e inferior nas amostras de carvalho negral. Observou-se um conteúdo médio em humidade de 8,74 %btq.

Na determinação do conteúdo em cinzas seguiu-se a norma CEN/TS 14775 de 2004, o procedimento, a equação de determinação e a tabela de dados intermédios encontram-se em anexo. Resumidamente neste procedimento as amostras sofrem primeiro uma secagem na estufa a 105 °C, depois são expostas a um aquecimento escalonado na mufla até aos 550 °C, com ventilação de ar. Na Tabela 4.1 observa-se que as amostras de pinheiro bravo (0,33 %btq) e o eucalipto (0,69 %btq) possuem menor conteúdo em cinzas, permitindo admitir que aquando da sua combustão resulta uma produção de cinzas inferior. Observou-se um conteúdo médio em cinzas superior na amostra de azinheira (4,33 %btq).

A determinação do conteúdo em matéria volátil foi efectuada segundo a norma CEN/TS 15148 de 2005, os procedimentos e equação usados na determinação encontram-se em anexo, tal como a tabela de dados intermédios. De forma sucinta, a determinação do conteúdo em matéria volátil é efectuada na mufla num aquecimento que é operado de forma gradual até aos 900 °C, em condições de ausência de O₂, para promoção da gasificação das amostras de biomassa. De seguida, procedeu-se ao arrefecimento até aos 200 °C, sensivelmente, para evitar que a biomassa carbonizasse na presença de O₂. O conteúdo em carbono fixo resulta da diferença entre o conteúdo em cinzas e o conteúdo em matéria volátil.

Pela Tabela 4.1 observa-se que a amostra de pinheiro bravo possui um conteúdo médio em matéria volátil inferior (73,72 %btq) e um conteúdo médio em carbono fixo superior (26,02 %btq), observando-se o inverso na amostra de carvalho negral, ou seja, um conteúdo médio em matéria volátil superior (87,35 %btq) e um conteúdo em carbono fixo inferior (9,09 %btq) ao das restantes amostras. Na amostra de carvalho negral observa-se um conteúdo em matéria volátil e em carbono fixo significativamente diferente do obtido num estudo de investigação da Universidade de Aveiro, no qual o conteúdo em matéria volátil rondava 72,2 %btq e o conteúdo em carbono fixo rondava 14,3 %btq. A razão deste resultado poderá estar associada ao facto de durante a determinação do conteúdo em matéria volátil ter ocorrido também a conversão (oxidação) de uma percentagem em carbono fixo.

Em termos de composição elementar das amostras de madeira o conteúdo em hidrogénio, azoto e enxofre é idêntico para as várias amostras. A amostra de sobreiro apresenta um conteúdo médio em carbono superior e a amostra de azinheira apresenta um conteúdo médio inferior. O

conteúdo médio em oxigénio foi superior na amostra de carvalho negral e inferior na amostra de sobreiro (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Caracterização elementar e imediata das amostras de biomassa em estudo.

	Sobreiro	Pinheiro bravo	Azinheira	Carvalho negral	Eucalipto
Análise Imediata (%btq)					
Humidade	9,80	9,08	8,39	7,94	8,48
Matéria Volátil	77,28	73,72	75,04	87,35	85,48
Carbono Fixo	20,57	26,02	20,65	9,09	13,95
Cinzas	3,04	0,33	4,33	2,97	0,69
Análise Elementar (%bs)					
C	51,61	51,40	46,12	45,92	48,60
H	6,03	6,20	6,06	6,21	6,20
N	0,18	0,16	0,22	0,31	0,16
S	n/d	n/d	<0,06	<0,06	n/d
O *	38,81	41,88	42,89	44,34	44,29

(*) Parâmetro determinado por diferença.

(n/d) - não determinado, porque o nível de concentração foi inferior ao nível de detecção (0,01 %bs).

Os poderes caloríficos (PCI e PCS) foram determinados laboratorialmente recorrendo ao calorímetro, excepto para a espécie sobreiro, obtendo-se analiticamente, com base na análise elementar (Equação 4.1 e Equação 4.2). No entanto, efectuou-se a verificação dos restantes poderes caloríficos pelo método analítico. Para a determinação do poder calorífico inferior (PCI) foi necessária a determinação prévia do poder calorífico superior (PCS).

$$PCS_R \left[\frac{MJ}{kg \text{ biomassa bs}} \right] = [0,3491 \cdot \%C + 1,1783 \cdot \%H + 0,1005 \cdot \%S - 0,1034 \cdot \%O - 0,0151 \cdot \%N - 0,021 \cdot \%cinza]$$

Equação 4.1

$$PCI_R \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kgbiomassa bs}} \right] = PCS_R + hws_{(T^\circ)} \cdot \left[W_{WR} + w_{HR} \cdot \frac{18}{2} \right]$$

Equação 4.2

Sendo W_{HR} a razão mássica de hidrogénio elementar na massa de biomassa em base seca.

Pela Tabela 4.2 observa-se que o sobreiro, o pinheiro bravo e o eucalipto são as espécies que se destacam com maior poder calorífico inferior. O poder calorífico inferior obtido analiticamente para o sobreiro é mais elevado que aquele que poderia ser de esperar, por exemplo tendo em consideração os valores determinados para a madeira de azinheira.

Tabela 4.2 – Poder calorífico inferior dos tipos de biomassa em estudo.

	Sobreiro	Pinheiro bravo	Azinheira	Carvalho negral	Eucalipto
Poder Calorífico Inferior					
(kJ/ Kg biomassa bs)	19446	17800	17785	17593	17900

4.2 EXPERIÊNCIAS COM COMBUSTÃO DE FOLHOSAS

Nestas experiências o combustível empregue tem origem em quatro espécies de árvore típicas em território português, da classe das folhosas (sobreiro, carvalho negral, azinheira e eucalipto).

Na Tabela 4.3 encontra-se a massa de cada carga aplicada e a descrição física.

Tabela 4.3 - Massa de cada carga nas experiências de combustão com madeira de folhosas.

	Carga	Massa de biomassa (kg)	Características das partículas carbonáceas
sobreiro	1ª	1,807	3 partículas de massa entre 500 e 600g;
	2ª	1,843	3 partículas de massa entre 500 e 600g;
	3ª	1,864	3 partículas de massa entre 500 e 600g;
carvalho negral	1ª	1,860	1 partícula de massa entre 200 e 300g e 4 de massa entre 500 e 600g;
	2ª	1,857	1 partícula de massa entre 200 e 300g e 4 de massa entre 500 e 600g;
	3ª	1,862	3 partículas de massa entre 500 e 600g e 1 de massa entre 200 e 300g;
azinheira	1ª	1,860	3 partículas de massa entre 500 e 600g;
	2ª	1,923	3 partículas de massa entre 500 e 600g e 1 de menor comprimento com massa compreendida entre 200 e 300g;
	3ª	1,999	3 partículas de massa entre 500 e 600g e 1 de menor comprimento com massa compreendida entre 200 e 300g;
	4ª	1,946	3 partículas de massa entre 500 e 600g e 1 de menor comprimento com massa compreendida entre 200 e 300g;
eucalipto	1ª	1,869	3 partículas de massa entre 500 e 600g, e 2 de massa entre 200 e 300g;
	2ª	1,891	3 partículas de massa entre 500 e 600g, e 2 de massa entre 200 e 300g;
	3ª	1,870	3 partículas de massa entre 500 e 600g, e 2 de massa entre 200 e 300g;

4.2.1 EXPERIÊNCIAS COM SOBREIRO

Pela Figura 4.2, observa-se que cada ciclo de combustão de uma carga é caracterizado por dois períodos principais: no primeiro período ocorre a secagem, a desvolatilização, a combustão dos voláteis e da biomassa, estando associado à presença de uma chama intensa e inconstante na câmara de combustão; e um segundo período, caracterizado pela combustão do carbonizado, durante a maior parte do qual não se observa ocorrência de uma chama. No segundo período de combustão observa-se uma velocidade de consumo de biomassa inferior, e a massa de carbonizado apresenta menos de metade da massa inicial da carga aplicada.

No segundo ciclo de combustão observam-se oscilações durante o segundo período de combustão, podendo estar em relação com funcionamento inadequado do sensor de carga, por perturbação no equilíbrio do conjunto grelha/sensor de carga (Figura 4.2).

Em todas as experiências de combustão o caudal de ar de combustão foi calculado para valores médios de um minuto em relação aos dados monitorizados.

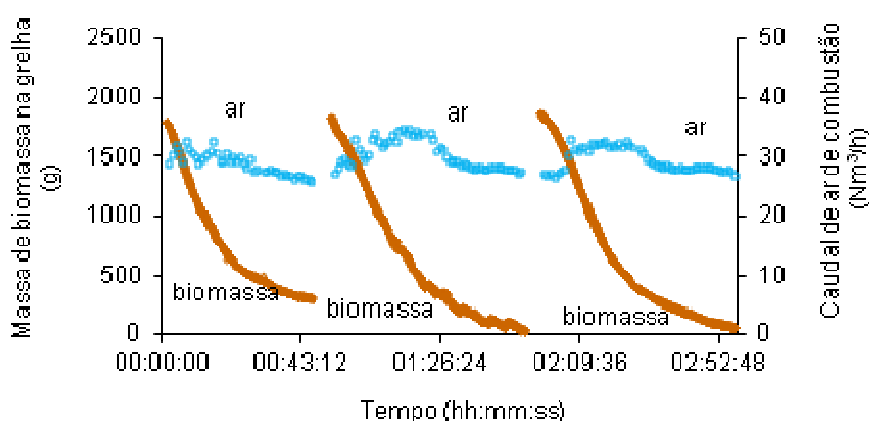


Figura 4.2 - Massa de biomassa na grelha e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com sobreiro.

Determinaram-se valores médios de velocidade de consumo de biomassa (em base tal de qual), para períodos de cinco minutos, sendo determinada pelo quociente entre a diferença de massa de biomassa na grelha e o intervalo de tempo correspondente, segundo a Equação 4.3.

$$\text{Velocidade de consumo de biomassa} \left[\frac{\text{kg biomassa btq}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{massa na grelha (1)} - \text{massa grelha (2)}}{\text{instante (2)} - \text{instante (1)}}$$

Equação 4.3

Na Figura 4.3 observa-se que a velocidade de consumo de biomassa foi diferente nos dois períodos de combustão. Após o início dos ciclos de combustão a velocidade de consumo de biomassa aumentou até atingir um pico máximo, uma vez que durante o período de chama ocorre uma maior degradação do combustível. No primeiro ciclo de combustão observou-se um valor mais elevado (4,5 kg/h).

No período de combustão do carbonizado, com o decréscimo de temperatura na câmara de combustão e na ausência de chama, diminui a velocidade de consumo de combustível na grelha.

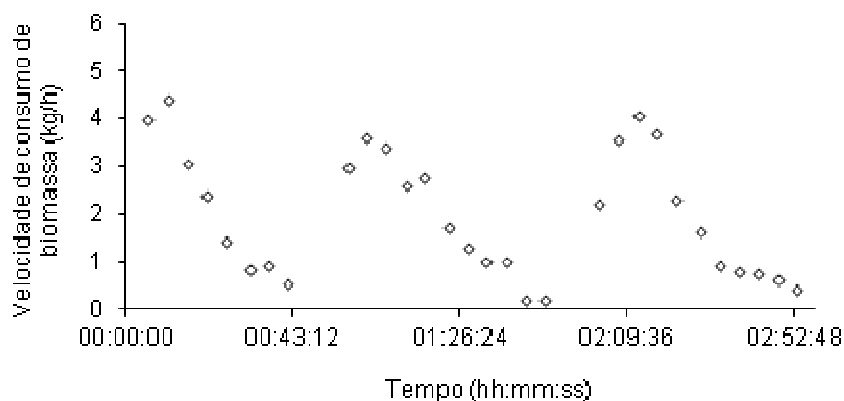


Figura 4.3 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de sobreiro.

Na Tabela 4.4 observa-se um maior consumo de biomassa no primeiro ciclo de combustão não só pontualmente como também durante um ciclo de combustão completo. Considerando os três ciclos de combustão obteve-se uma velocidade de consumo médio de biomassa de 1,86 kg/h. A degradação da biomassa foi mais intensa no primeiro período, obtendo-se uma velocidade de consumo de biomassa média de 3,0 kg/h e no segundo período foi inferior, obtendo-se 0,69 kg/h.

Observa-se que a velocidade de consumo de biomassa no período de combustão com chama é cerca de 4,5 vezes superior à obtida no período de combustão do carbonizado.

O caudal volumétrico de ar de combustão médio foi de 29,57 Nm³/h, sendo análogo aos valores da literatura, para um fogão com fornecimento de ar não controlado.

Tabela 4.4 - Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com sobreiro.

Ciclo de combustão	Consumo global médio [kg/h]	Consumo na fase com chama [kg/h]	Consumo na fase de combustão do carbonizado [kg/h]	Caudal médio de ar [Nm ³ /h]
1º	1,98	2,90	0,61	28,89
2º	1,81	3,00	0,73	30,38
3º	1,80	3,09	0,74	29,45
Média	1,86	3,00	0,69	29,57

Pela Figura 4.4 observa-se que a evolução da temperatura na câmara de combustão está directamente associada à velocidade de consumo de biomassa, portanto aos dois principais períodos de decomposição do combustível. Inicialmente, a temperatura na câmara de combustão ronda os 150 °C, aumentando de modo gradual até atingir temperaturas mais elevadas. Durante o primeiro período de combustão observam-se flutuações da chama e de temperatura resultantes da desvolatilização e da combustão dos voláteis. Posteriormente, durante o segundo período inicia-se o decréscimo de temperatura, na ausência de flutuações significativas (Figura 4.4).

No segundo e terceiro ciclos de combustão observaram-se maiores temperaturas na câmara de combustão em torno de 721 °C.

O caudal volumétrico de ar de combustão verificou-se ligeiramente inferior no primeiro ciclo de combustão assim como a temperatura na câmara de combustão, contudo não se verificou afectação na velocidade de consumo de biomassa (Figura 4.4). De modo inverso, observou-se que nos ciclos de combustão com maiores temperaturas na câmara de combustão a velocidade de consumo de biomassa foi inferior (Figura 4.2).

O caudal de ar de combustão foi máximo no primeiro período de combustão, no qual se observaram maiores temperaturas na câmara de combustão.

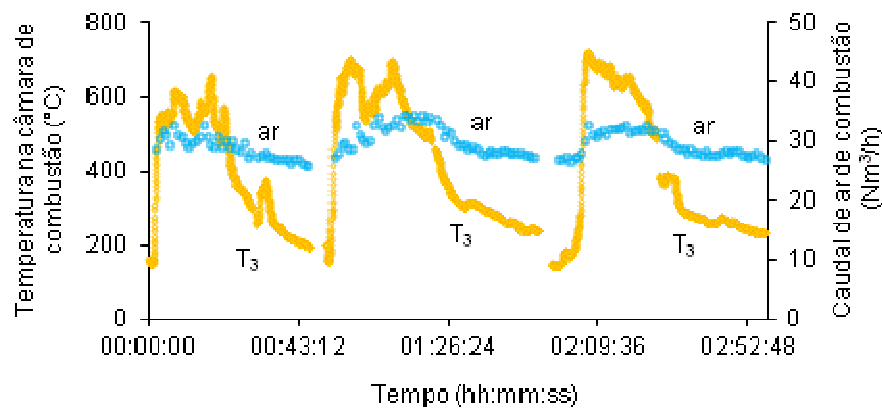


Figura 4.4 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com sobreiro.

O equipamento de aquisição de dados não permite a monitorização simultânea de temperaturas (nos vários pontos da instalação experimental) com os restantes parâmetros. Portanto, nos ciclos de combustão foram monitorizadas apenas a temperatura na câmara de combustão (T_3 na Figura 4.5) e a temperatura dos gases de combustão, à saída da conduta de exaustão (T_9 na Figura 4.5).

O período de temperaturas mais elevadas variou entre 20 a 30 minutos, correspondendo ao período de maior consumo de biomassa (Figura 4.2, Figura 4.5). Na Figura 4.5 observam-se flutuações de temperatura durante este período, que se relacionam com o período de chama intensa e turbulenta, em resultado da desvolatilização e combustão dos voláteis.

Após a extinção da chama a temperatura na câmara de combustão diminui gradualmente, não se observando flutuações significativas, permanecendo a combustão do carbonizado, uma vez que a combustão dos voláteis ocorrem durante o primeiro período (Figura 4.5).

A temperatura nos gases de exaustão ronda os 200°C (Figura 4.5).

O caudal de ar de combustão aumenta após o período inicial de cada ciclo de combustão, atingindo assim os valores mais elevados durante o período de maiores temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão, diminuindo com as temperaturas (Figura 4.4).

No período inicial dos ciclos de combustão, a temperatura dos gases de combustão e a expulsão dos gases pela conduta de exaustão impulsionam o aumento do caudal de ar de combustão agindo como forçamento por convecção, sendo a razão para a observação de um caudal superior durante o período de combustão com chama.

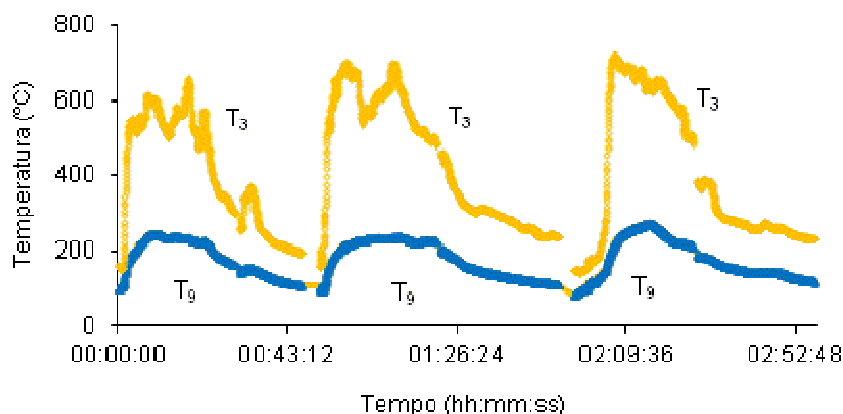


Figura 4.5 – Evolução de temperaturas da câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com sobreiro (Legenda: T_3 - temperatura na câmara de combustão, T_9 - temperatura dos gases de exaustão).

Observa-se uma relação entre as temperaturas T_3 e T_9 nos vários ciclos de combustão (Figura 4.6). A temperatura na câmara de combustão varia na gama 150 a 700 °C, ao passo que a temperatura nos gases de exaustão varia na gama 90 a 300 °C. A relação de temperaturas foi análoga nos três ciclos de combustão, no entanto no primeiro ciclo foram monitorizadas temperaturas na câmara de combustão inferiores.

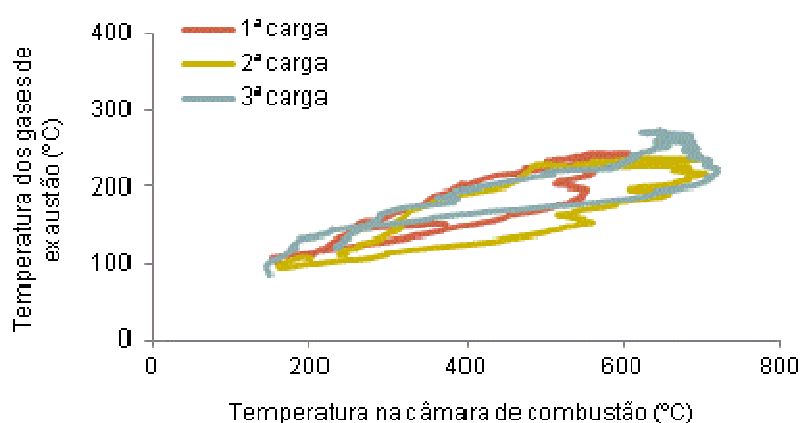


Figura 4.6 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com sobreiro.

Efectuou-se um ciclo de combustão para monitorizar a evolução de temperaturas, nos sete pontos da instalação experimental. Neste caso concreto é um excerto de um ciclo de combustão, com uma duração de 28 minutos, abrangendo o período inicial de combustão.

A temperatura do ar de convecção forçado (T_7) rondou os 60 °C. Observa-se uma temperatura máxima acima da grelha (T_2) em torno dos 450 °C e uma temperatura máxima no topo da câmara de combustão (T_3) de cerca de 280 °C. A temperatura dos gases de combustão à saída da conduta de exaustão (T_6) ronda os 100 °C. A temperatura do ar de combustão (T_1) ronda os 20 °C (temperatura ambiente do ar interior do laboratório) (Figura 4.7).

Pela Figura 4.7 não se observam oscilações de temperatura durante este período de combustão.

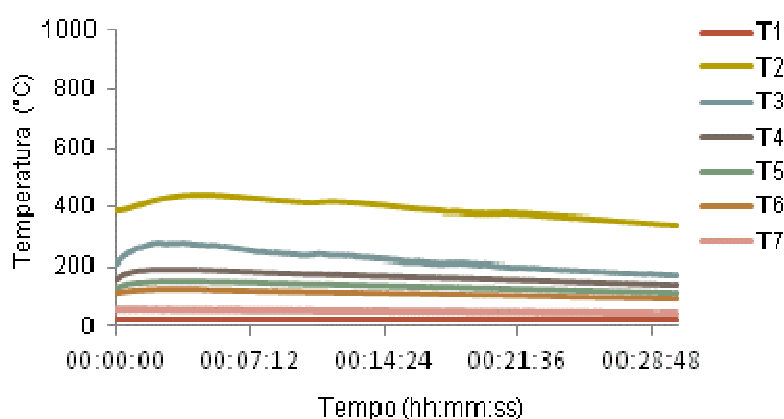


Figura 4.7 - Evolução de temperatura num excerto de uma experiência com sobreiro (Legenda: T_1 - temperatura do ar de combustão; T_2 - temperatura na grelha; T_3 - temperatura acima da grelha; T_4 - temperatura à saída da câmara de combustão; T_5 -temperatura após a conduta de isolamento térmico; T_6 - temperatura à saída da chaminé e T_7 - temperatura do ar de convecção forçado).

Pela Figura 4.8 observa-se que após o período inicial de um ciclo de combustão, no período de maior consumo de combustível, ocorre o aumento da concentração de CO_2 e a diminuição da concentração de O_2 à medida que a biomassa é consumida. É neste período inicial que se observa um pico de concentração máxima de CO. Observou-se um pico de concentração de CO mais significativo no segundo e terceiro ciclos de combustão. No terceiro ciclo de combustão observou-se um pico máximo de 7400 ppmv em gases secos.

Os picos de concentração de CO são característicos da desvolatilização da biomassa em ambiente de elevadas temperaturas, durante o primeiro período de combustão de uma carga. A libertação

de inqueimados (CO e CH_4) está relacionada com as condições de ignição de um ciclo de combustão, como causas tem-se a baixa temperatura na câmara de combustão aquando da alimentação da carga de biomassa, em torno dos $150\text{ }^\circ\text{C}$; e a não ignição da mistura gasosa, resultante da desvolatilização do combustível e mistura com o ar de combustão, após o fecho da porta da câmara de combustão.

Após o pico de concentração de CO , as concentrações de CO e de O_2 diminuem mediadas pelo consumo de biomassa. Paralelamente, observa-se o aumento da concentração de CO_2 , em simultâneo com o aumento da temperatura na câmara de combustão e consequente aumento da temperatura dos gases de exaustão (Figura 4.8).

No segundo período de combustão observa-se um segundo pico de concentração de CO , embora menos significativo. Pela Figura 4.8 observa-se que a concentração de CO aumenta apesar da elevada concentração de O_2 em relação à observada no período anterior. A concentração de CO neste período é resultado da oxidação do carbonizado remanescente e dos gases de combustão.

No segundo período de combustão, com a extinção da chama, a concentração de O_2 é incrementada gradualmente pela indisponibilidade de combustível na grelha e pela diminuição da velocidade de consumo, por outro lado, a concentração de CO_2 diminui (1,5 % em gases secos). Observa-se o aumento da concentração de CO , até cerca de 4000 ppmv em gases secos, e de O_2 , a 19,5 % em gases secos, de modo que neste período, a concentração de O_2 não é limitante no processo.

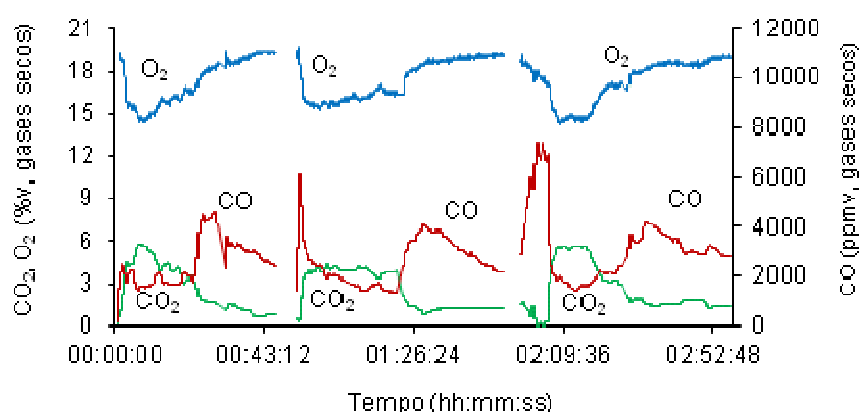


Figura 4.8 - Concentração de gases de exaustão, CO_2 , CO e O_2 , durante a combustão de sobreiro.

Na Figura 4.9 observa-se que no primeiro ciclo de combustão a concentração de hidrocarbonetos (CH_4 em gases húmidos) é muito inferior à obtida nos ciclos de combustão seguintes, estando relacionada com a não ocorrência do pico de concentração de CO observado na Figura 4.8.

Após o início do primeiro período de combustão do terceiro ciclo observou-se um pico de concentração de CH_4 de 4200 ppmv em gases húmidos, em simultâneo com o pico de concentração de CO (Figura 4.9). No segundo período de combustão o aumento da concentração de CH_4 foi inferior ao observado em relação à concentração de CO.

No primeiro ciclo de combustão observaram-se temperaturas na câmara de combustão inferiores, no entanto, observaram-se velocidades de consumo de combustível superiores. Esta observação resulta da ocorrência de um processo de pirólise inicial significativamente inferior em relação ao observado nos seguintes ciclos de combustão. De modo complementar, possivelmente os picos de inqueimados menos significativos estão associados a uma maior eficiência do equipamento durante este ciclo de combustão.

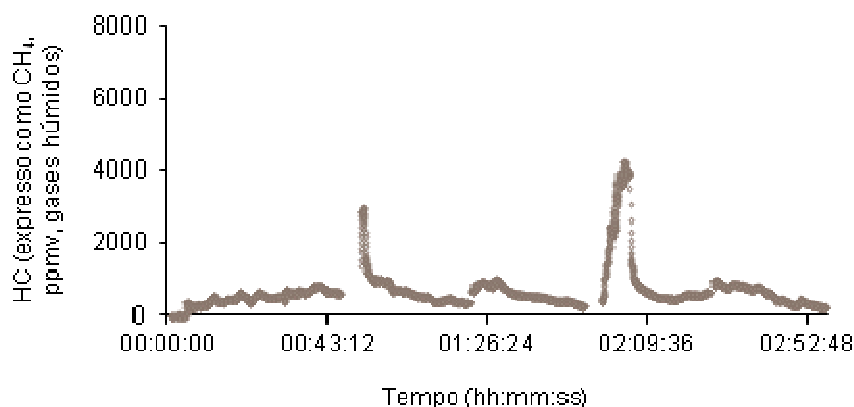


Figura 4.9 - Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de sobreiro.

4.2.2 EXPERIÊNCIAS COM CARVALHO NEGRAL

No segundo ciclo de combustão a massa inicial de biomassa colocada na grelha foi de 1857 g, no entanto devido a erros no sensor de carga foram removidos do gráfico alguns valores iniciais. Portanto na Figura 4.10 a massa inicial observada no segundo ciclo de combustão é inferior à que foi colocada.

Na Figura 4.10 observa-se que no primeiro período de um ciclo de combustão o caudal volumétrico de ar de combustão ronda 30 Nm³/h, análogo ao valor da literatura.

Observa-se a presença de dois períodos principais de combustão, já descritos. No primeiro período observa-se uma velocidade de consumo de biomassa superior e no segundo período observa-se uma velocidade de consumo inferior e pouco significativa.

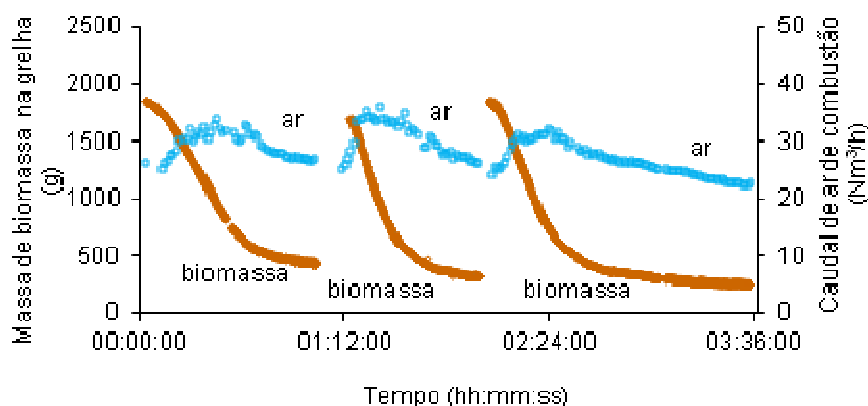


Figura 4.10 – Massa de biomassa na grelha e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com carvalho negral.

Na Figura 4.11 observou-se um valor máximo pontual para a velocidade de consumo de biomassa no segundo ciclo de combustão de 4,5 kg/h. A velocidade de consumo de biomassa após o pico máximo decresceu em função do consumo de massa de combustível na grelha.

No primeiro ciclo de combustão observa-se uma baixa inclinação da curva de massa de biomassa na grelha (Figura 4.10), indicando uma menor velocidade de consumo de biomassa durante o primeiro período de combustão (Figura 4.11). Este resultado relaciona-se com o processo de combustão lenta associado a este tipo de combustível.

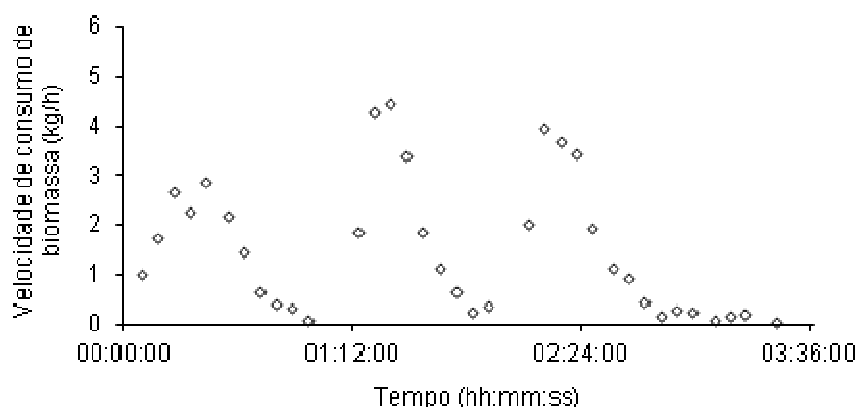


Figura 4.11 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de carvalho negral.

Na Tabela 4.5 observa-se uma velocidade de consumo de biomassa média de 1,86 kg/h e um caudal volumétrico de ar de combustão médio de 30,40 Nm³/h. A velocidade de consumo de biomassa média em cada ciclo de combustão não variou significativamente.

Pela Tabela 4.5 observou-se que a velocidade de consumo de biomassa global no primeiro ciclo de combustão foi compensada por uma velocidade de consumo de combustível superior durante o segundo período. Dado que, neste ciclo a velocidade de consumo de biomassa foi inferior no primeiro período de combustão, em relação aos ciclos seguintes.

Observou-se um caudal de ar de combustão superior no período onde se observaram velocidades de consumo de biomassa superiores (Figura 4.10 e Tabela 4.5). No segundo ciclo de combustão observou-se uma velocidade de consumo de biomassa superior tanto no primeiro período (3,59 kg/h) como no segundo período de combustão (0,94 kg/h).

Tabela 4.5 – Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com carvalho negral.

Ciclo de Combustão	Consumo global médio [kg/h]	Consumo na fase com chama [kg/h]	Consumo na fase de combustão do carbonizado [kg/h]	Caudal médio de ar [Nm ³ /h]
1º	1,86	2,21	1,44	30,23
2º	1,87	3,59	0,94	30,40
3º	1,86	3,02	0,67	26,79
Média	1,86	2,94	1,02	29,1

Temperaturas na câmara de combustão elevadas implicam temperaturas nos gases de exaustão superiores. Durante a combustão de madeira, a presença de temperaturas superiores age como força motriz da admissão de caudal de ar de combustão à câmara de combustão.

Observaram-se temperaturas na câmara de combustão superiores no primeiro ciclo de combustão, no entanto observou-se uma velocidade de consumo de biomassa inferior. Neste ciclo o caudal de ar de combustão foi ligeiramente inferior ao observado no segundo ciclo de combustão.

A diminuição da temperatura na câmara de combustão relaciona-se com o decréscimo da velocidade de consumo de combustível, pela crescente indisponibilidade de combustível na grelha.

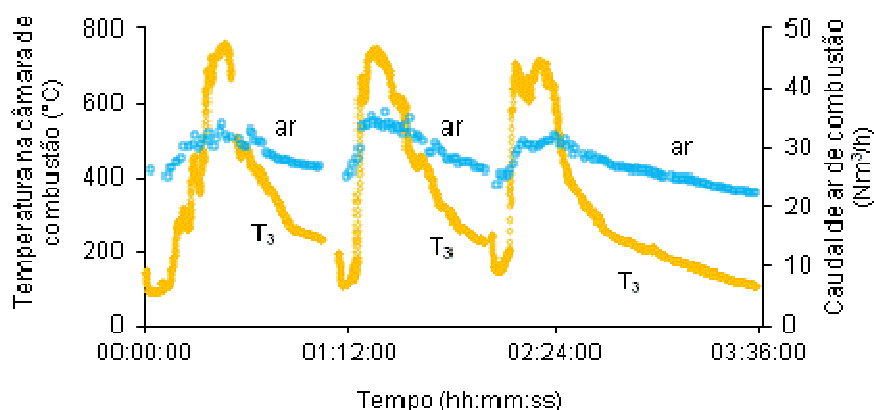


Figura 4.12 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com carvalho negral.

Na Figura 4.13 observa-se que no primeiro ciclo de combustão, durante o período de combustão com chama, a temperatura atingida na câmara de combustão foi ligeiramente superior à observada nos ciclos seguintes, no entanto neste ciclo observou-se uma menor temperatura dos gases de exaustão em torno de 300 °C.

Durante o período de combustão com chama a temperatura na câmara de combustão variou na gama de 250 a 765 °C.

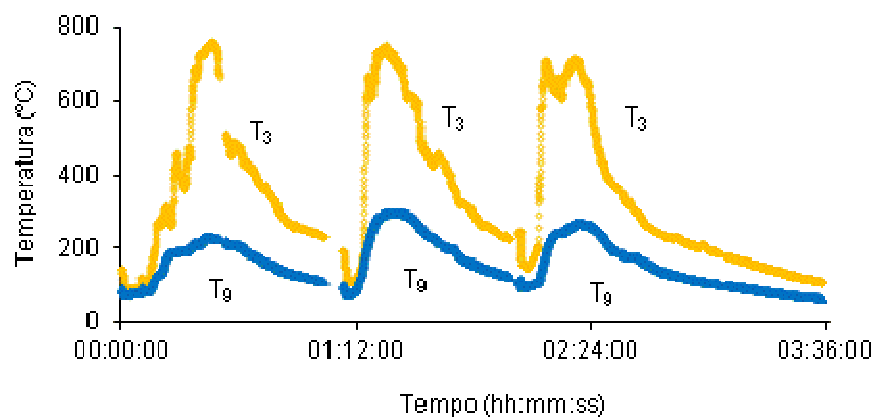


Figura 4.13 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com carvalho negral (Legenda: T_3 - temperatura na câmara de combustão, T_g - temperatura dos gases de exaustão).

De modo análogo ao realizado na combustão com sobreiro, efectuou-se o gráfico da Figura 4.14 para analisar a relação entre as temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão. A temperatura na câmara de combustão variou na gama 100 a 750 °C, e a temperatura nos gases de exaustão na gama 70 a 300 °C.

Observou-se uma relação semelhante entre as duas temperaturas, embora nos dois primeiros ciclos de combustão se tenham observado menores variações.

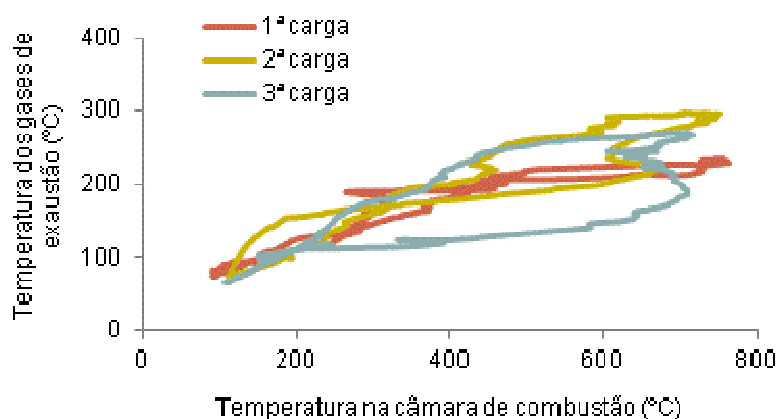


Figura 4.14 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com carvalho negral.

Monitorizou-se a evolução de temperaturas em sete pontos da instalação experimental, durante um excerto de um ciclo de combustão. Neste ciclo de combustão a medição decorreu durante os primeiros 28 minutos, à semelhança do efectuado na experiência de combustão com sobreiro.

Na Figura 4.15 observa-se uma temperatura acima da grelha (T_2) em torno de 850 °C. Observa-se uma temperatura no topo da câmara de combustão (T_3) próxima da temperatura dos gases de exaustão à saída da câmara de combustão (T_4), nos quais o máximo ronda 380 °C (Figura 4.15).

A temperatura do ar de combustão (T_1) ronda 20 °C. A temperatura máxima dos gases de combustão à saída da conduta de exaustão (T_6) ronda 200 °C.

Neste ciclo de combustão não foi efectuada a medição da temperatura do ar de convecção forçado.

Comparando com o ciclo de combustão do sobreiro, presenciaram-se, neste ciclo de combustão, maiores oscilações de temperaturas, para um período de combustão idêntico.

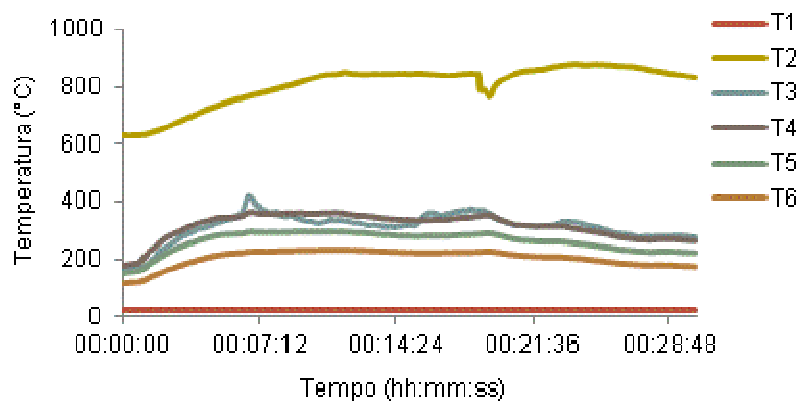


Figura 4.15 – Evolução de temperaturas num excerto de uma experiência com carvalho negral (Legenda: T₁- temperatura do ar de combustão; T₂- temperatura na grelha; T₃- temperatura acima da grelha; T₄- temperatura à saída da câmara de combustão; T₅-temperatura após a conduta de isolamento térmico; T₆- temperatura à saída da chaminé).

Na Figura 4.16 observa-se que após o início de um ciclo de combustão surge um pico de concentração de CO, tendo-se obtido um valor máximo de 10000 ppmv em gases secos, no terceiro ciclo de combustão. A concentração de CO₂ permanece em valores relativamente baixos, variando na gama 5 % a 8 %, em gases secos. Após o pico máximo de concentração de CO as concentrações de O₂ e de CO decrescem gradualmente à medida que o combustível é consumido. As concentrações mais elevadas de CO₂ estão relacionadas com a redução da concentração de O₂ e da concentração de CO durante o primeiro período de combustão.

No segundo período de combustão observam-se novamente picos de CO, mais evidentes no segundo e terceiro ciclos de combustão, resultando de uma combustão incompleta que conduziu à diminuição da concentração de CO₂ para 1 % em gases secos. Na ausência de chama proporcionada pela diminuição da massa de combustível na grelha., observa-se a diminuição das temperaturas, que conduz à diminuição da velocidade de oxidação de inqueimados, promovendo a elevação da concentração de O₂ na câmara de combustão.

No primeiro ciclo de combustão observaram-se menores consumos de biomassa, maior temperatura na câmara de combustão e uma menor taxa de pirólise, com emissão de menores concentrações de CO em relação aos ciclos seguintes. A concentração de O₂ foi superior no primeiro ciclo de combustão, podendo relacionar-se com uma menor concentração de inqueimados nos gases de combustão.

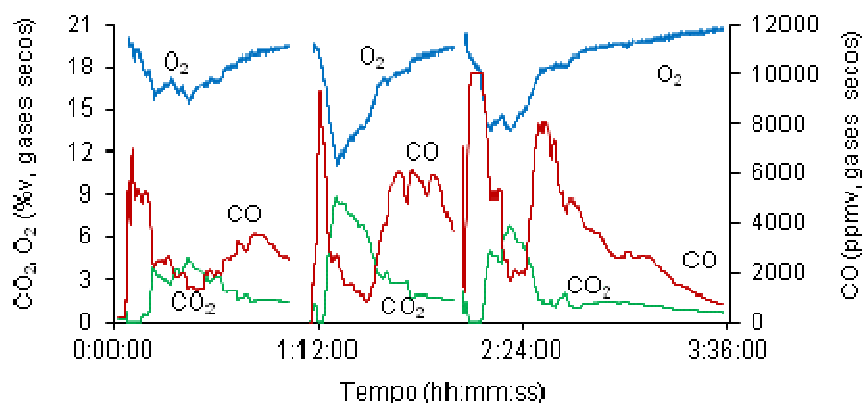


Figura 4.16 - Concentração de gases de exaustão, CO₂, CO e O₂, durante a combustão de carvalho negral.

Na Figura 4.17 observa-se um pico de concentração de CH₄ no terceiro ciclo de combustão, cerca de 7000 ppmv em gases húmidos. Relacionando-se com o pico de concentração de CO, observado na Figura 4.16, indicando uma taxa de pirólise intensa no início deste ciclo. No primeiro e segundo ciclos de combustão os picos de concentração de CH₄ não foram tão evidentes, no entanto, em termos do pico de concentração de CO apenas o primeiro ciclo de combustão ficou aquém dos restantes.

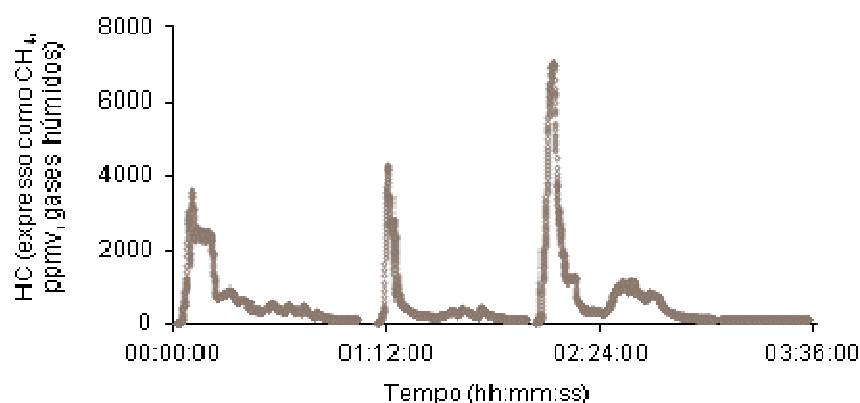


Figura 4.17 - Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão do carvalho negral.

4.2.3 EXPERIÊNCIAS COM AZINHEIRA

Na Figura 4.18 pela observação da inclinação das curvas de massa de biomassa na grelha, constata-se que o consumo de biomassa foi superior no terceiro e quarto ciclos de combustão. Observa-se um caudal volumétrico de ar de combustão superior no primeiro período de combustão, no qual a combustão foi mais intensa, rondando $30 \text{ Nm}^3/\text{h}$, semelhante ao valor da literatura (Figura 4.18).

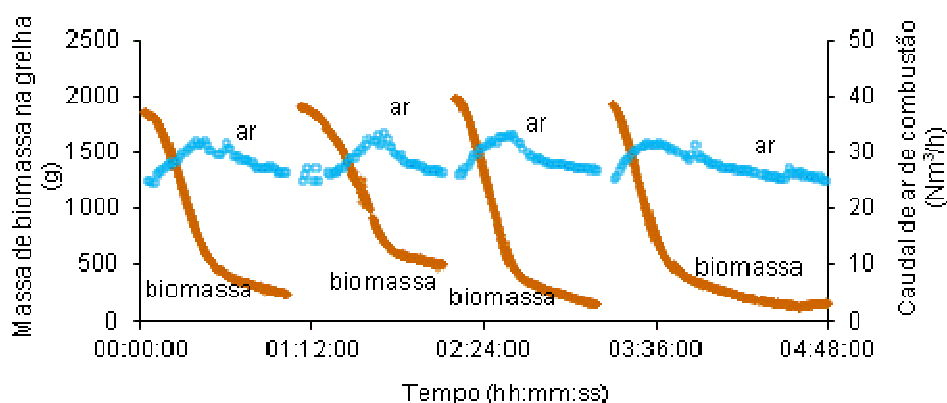


Figura 4.18 - Massa de biomassa na grelha e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com azinheira.

Na Figura 4.19 observa-se que após o início de um ciclo de combustão, a velocidade de consumo de biomassa é incrementada até atingir um pico durante o primeiro período de combustão, posteriormente decresce à medida que o combustível é consumido. Observou-se uma velocidade de consumo de biomassa superior no período de chama intensa e oscilante, em consequência da desvolatilização e combustão da mistura gasosa dos voláteis com o ar de combustão.

A velocidade de consumo de biomassa atingiu um valor máximo pontual no terceiro e quarto ciclos de combustão, rondando $4,5 \text{ kg/h}$.

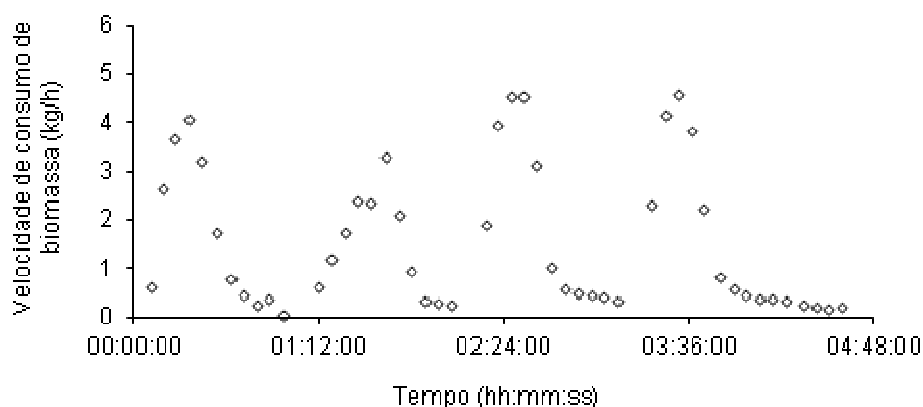


Figura 4.19 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de azinheira.

Na Tabela 4.6 observa-se uma velocidade de consumo médio de biomassa de 1,95 kg/h. Tendo em conta todos os ciclos de combustão a velocidade média de consumo de biomassa foi superior no terceiro ciclo de combustão, correspondendo a 2,05 kg/h. A velocidade de consumo de biomassa média, no período de chama, foi superior no terceiro e quarto ciclos de combustão, dada por 3,89 kg/h e 3,80 kg/h, respectivamente.

No segundo ciclo de combustão a velocidade de consumo de biomassa no primeiro período de combustão (1,88 kg/h) foi compensada por uma velocidade de consumo de biomassa superior no período de combustão do carbonizado (1,29 kg/h), pelo que num ciclo completo a velocidade de consumo de biomassa foi de 1,91 kg/h.

O caudal volumétrico de ar de combustão médio observado foi de 29,12 Nm³/h, análogo ao valor da literatura. Pela Tabela 4.6 observa-se no segundo ciclo de combustão um caudal volumétrico de ar de combustão superior dado por 30,24 Nm³/h.

Tabela 4.6 - Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com azinheira.

Ciclo de combustão	Consumo global médio [kg/h]	Consumo na fase com chama [kg/h]	Consumo na fase de combustão do carbonizado [kg/h]	Caudal médio de ar [Nm ³ /h]
1º	1,86	2,90	0,78	28,79
2º	1,91	1,88	1,29	30,24
3º	1,98	3,89	0,78	29,38
4º	2,05	3,80	0,78	28,06
Média	1,95	3,12	0,91	29,12

Na Figura 4.20 observa-se que durante o período de maior consumo de biomassa a temperatura na câmara de combustão foi superior, correspondente a 755 °C. No período de temperaturas mais elevadas observa-se um caudal de ar de combustão superior.

A velocidade de consumo de biomassa é inferior no primeiro período do segundo ciclo de combustão, no entanto a evolução da temperatura na câmara de combustão não difere significativamente da obtida nos ciclos seguintes. Observa-se uma temperatura máxima inferior no primeiro ciclo de combustão.

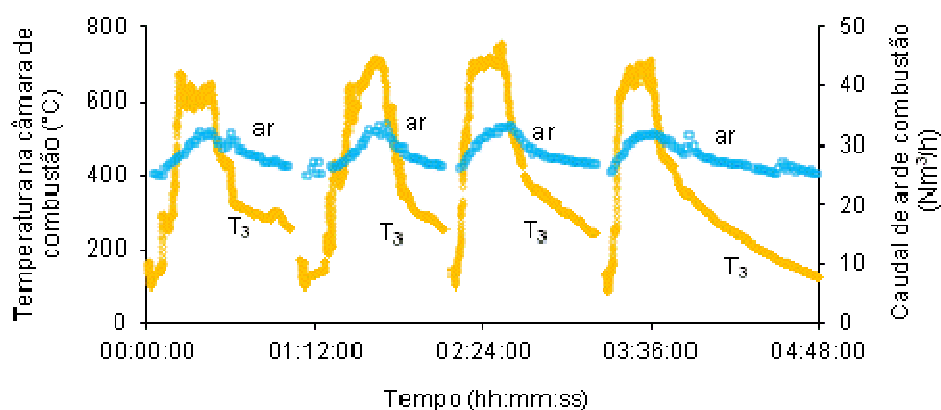


Figura 4.20 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com azinheira.

Observaram-se menores temperaturas na câmara de combustão durante o primeiro ciclo de combustão. A temperatura máxima nos gases de exaustão foi de 306 °C e a temperatura máxima na câmara de combustão foi de 755 °C (Figura 4.21).

O período de maiores temperaturas corresponde ao período de combustão com chama, no qual ocorre um maior consumo de biomassa.

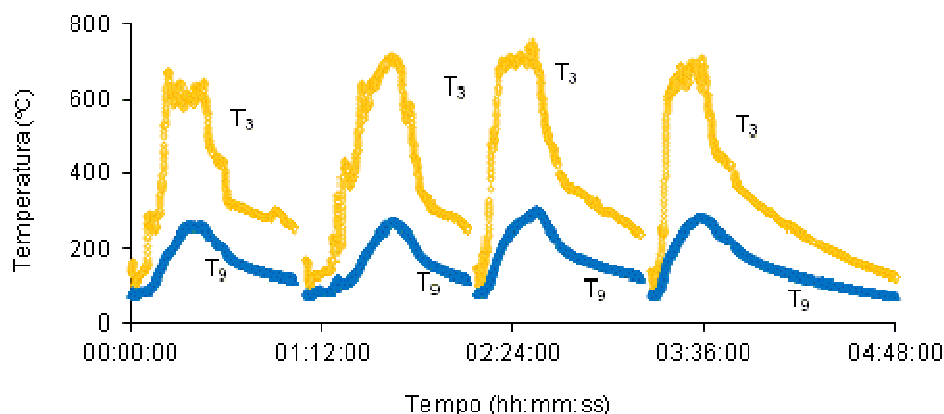


Figura 4.21 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão na combustão durante a experiência com azinheira (Legenda: T_3 - temperatura na câmara de combustão, T_g - temperatura dos gases de exaustão).

Observa-se uma relação entre a temperatura na câmara de combustão e a temperatura nos gases de exaustão. Esta relação foi semelhante nos vários ciclos de combustão, observando-se fortes oscilações de temperatura.

Na Figura 4.22 observa-se que a temperatura na câmara de combustão varia na gama 100 a 720 °C, e a temperatura nos gases de exaustão varia na gama 80 a 300 °C.

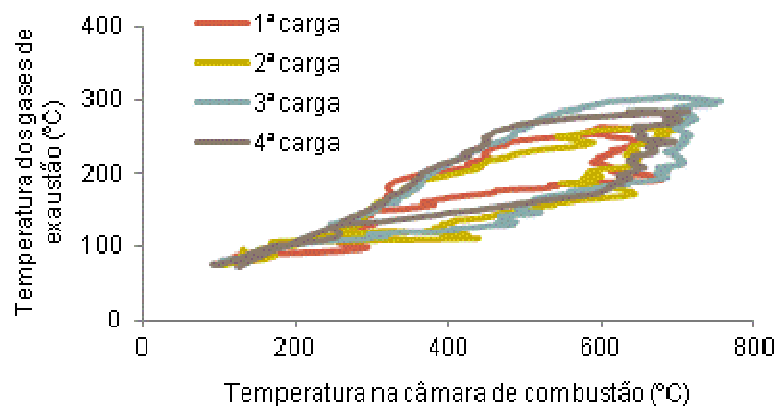


Figura 4.22 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com azinheira.

Efectuou-se um ciclo completo de combustão durante um período de cerca de 1 hora e 10 minutos para monitorizar a evolução de temperaturas nos sete pontos da instalação experimental. Neste ciclo de combustão observaram-se maiores oscilações de temperatura.

A temperatura do ar de convecção forçado (T_7) foi de 60 °C. A temperatura do ar de combustão (T_1) foi de 19°C (Figura 4.23).

Após 40 minutos do início do ciclo de combustão a temperatura no topo da câmara de combustão (T_3) atingiu um valor máximo de 700 °C. Durante o período inicial a temperatura máxima acima da grelha (T_2) foi de 850 °C. A temperatura máxima dos gases de exaustão (T_6) foi de 250 °C (Figura 4.23).

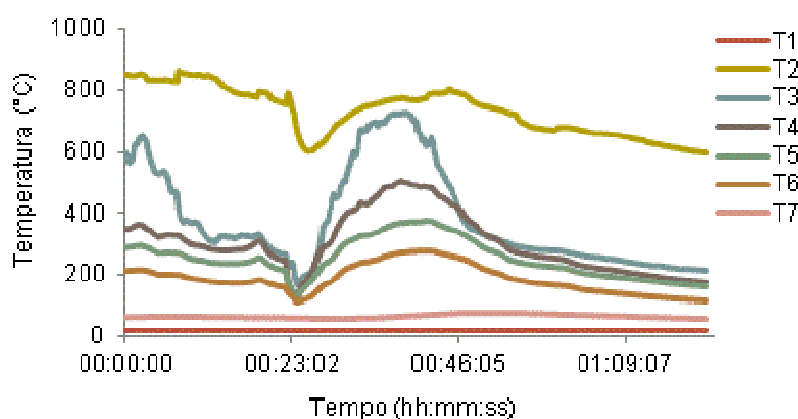


Figura 4.23 - Evolução de temperaturas num enxerto de uma experiência com azinheira (Legenda: T₁- temperatura do ar de combustão; T₂- temperatura na grelha; T₃- temperatura acima da grelha; T₄- temperatura à saída da câmara de combustão; T₅-temperatura após a conduta de isolamento térmico; T₆- temperatura à saída da chaminé e T₇- temperatura do ar de convecção forçado).

Na Figura 4.24 observa-se que após o início de um ciclo de combustão ocorre um pico de concentração de CO, sendo que o máximo foi observado no terceiro e quarto ciclos de combustão, cerca de 9000 ppmv em gases secos. Em simultâneo observam-se concentrações de O₂ superiores, rondando 21 % em gases secos.

À medida que a biomassa é consumida, na presença de chama, a concentração de O₂ diminui até cerca de 12 % em gases secos, também a concentração de CO diminui gradualmente. Com a redução da concentração de O₂ e de CO observa-se a elevação da concentração de CO₂ no período de maior consumo de biomassa e de maiores temperaturas na câmara de combustão (Figura 4.24).

No período de combustão do carbonizado observa-se o aumento gradual da concentração de CO, obtendo-se um novo pico de concentração, no entanto, é menos significativo que o observado no primeiro período de combustão. Simultaneamente ocorre a elevação da concentração de O₂, para valores na gama 18 a 20 % em gases secos, devido à ausência de chama, à indisponibilidade de combustível na grelha e à diminuição de temperaturas (Figura 4.24).

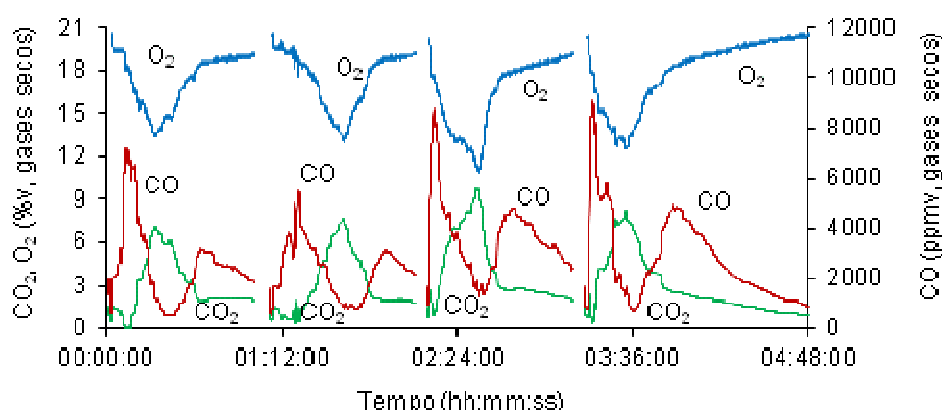


Figura 4.24 – Concentração de gases de exaustão, CO_2 , CO e O_2 , durante a combustão de azinheira.

Os picos de concentração de CH_4 e de CO não foram coincidentes. A emissão de CH_4 foi ligeiramente superior no primeiro ciclo de combustão, cerca de 3000 ppmv em gases húmidos (Figura 4.25).

No segundo ciclo de combustão o pico de concentração de CH_4 foi inferior ao dos restantes ciclos de combustão, coincidindo com o pico inferior de CO (Figura 4.24, Figura 4.25). Neste ciclo foram determinadas menores velocidades de consumo de biomassa.

As maiores concentrações de CH_4 estarão relacionadas com a fase de pirólise. Em termos de concentração de CH_4 não se observam diferenças significativas entre os ciclos de combustão.

Os picos de concentração de CH_4 durante a experiência de combustão com azinheira foram inferiores aos registados na combustão de sobreiro e carvalho negral.

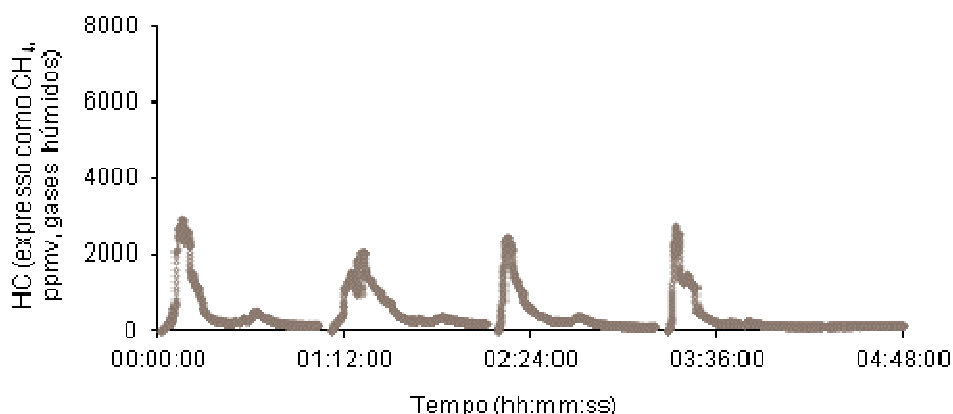


Figura 4.25 – Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de azinheira.

4.2.4 EXPERIÊNCIAS COM EUCALIPTO

A evolução da massa de biomassa na grelha observa-se idêntica nos vários ciclos de combustão (Figura 4.26). O caudal volumétrico de ar de combustão ronda 32 Nm³/h. O caudal de ar de combustão possui menores flutuações no terceiro ciclo de combustão.

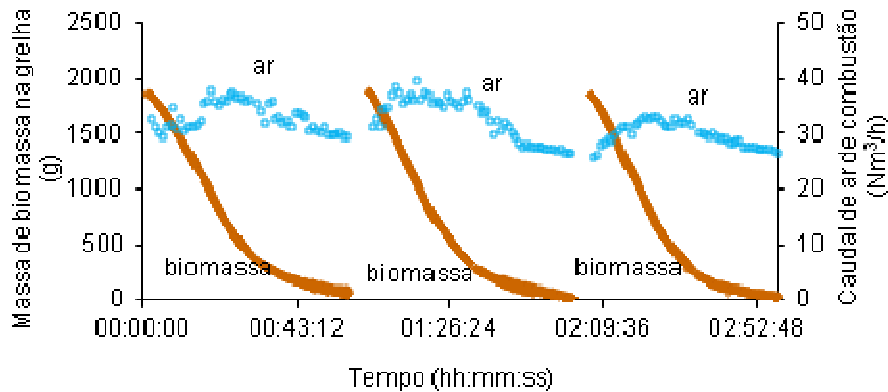


Figura 4.26 - Massa de biomassa e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com eucalipto.

Observaram-se valores pontuais de velocidade de consumo de biomassa superiores no terceiro ciclo de combustão, cerca de 4,5 kg/h (Figura 4.27). No entanto, a velocidade de consumo de biomassa foi semelhante nos vários ciclos de combustão.

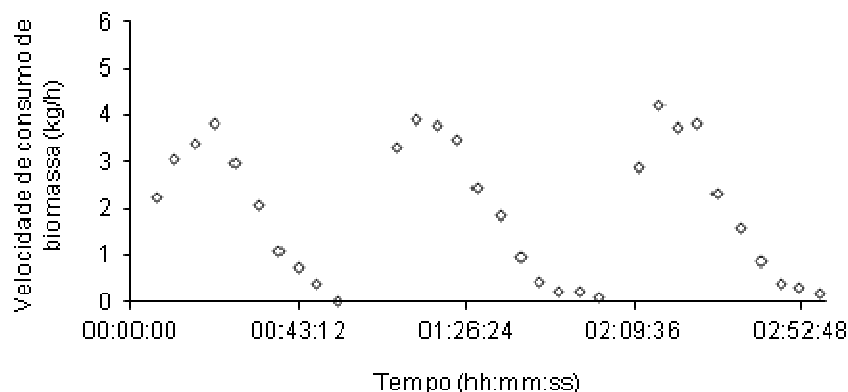


Figura 4.27 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de eucalipto.

A velocidade de consumo de biomassa média global foi de 1,94 kg/h. No período de combustão com chama observou-se um valor superior no terceiro ciclo de combustão, de 3,51 kg/h, e no período de combustão do carbonizado observou-se um valor superior no primeiro ciclo de combustão, de 0,80 kg/h (Tabela 4.7).

O caudal volumétrico de ar de combustão médio foi de 31,88 Nm³/h, tendo-se observado um valor superior no primeiro ciclo de combustão (33,13 Nm³/h).

Tabela 4.7 - Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com eucalipto.

Ciclo de combustão	Consumo global médio [kg/h]	Consumo na fase com chama [kg/h]	Consumo na fase de combustão do carbonizado [kg/h]	Caudal médio de ar [Nm ³ /h]
1º	1,91	3,06	0,80	33,13
2º	1,95	3,22	0,56	32,76
3º	1,96	3,51	0,65	29,74
Média	1,94	3,26	0,67	31,88

Na Figura 4.28 observa-se que no terceiro ciclo de combustão a temperatura na câmara de combustão foi ligeiramente inferior à dos restantes ciclos, no entanto neste ciclo ocorreu um consumo de biomassa global superior. No terceiro ciclo de combustão as menores temperaturas na câmara de combustão contribuíram para um menor caudal de ar de combustão durante o primeiro período. No terceiro ciclo de combustão são observadas menores oscilações de temperatura na câmara de combustão, podendo indicar uma combustão menos tumultuosa em relação aos restantes ciclos.

As temperaturas na câmara de combustão foram superiores no segundo ciclo de combustão, tendo-se obtido um valor máximo de 737 °C.

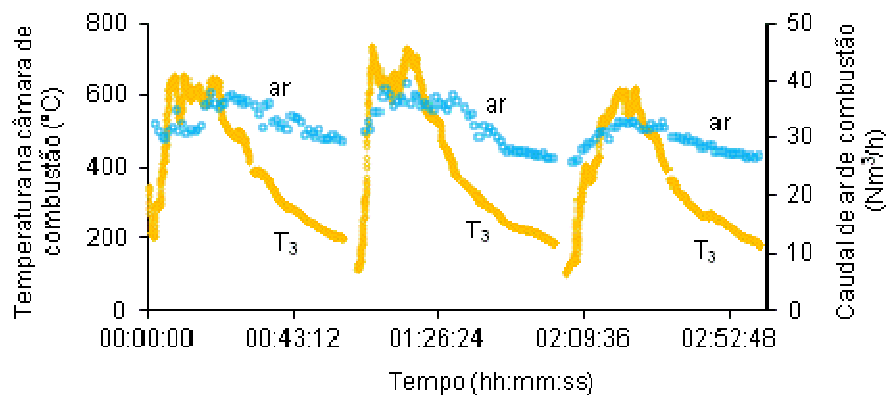


Figura 4.28 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com eucalipto.

A temperatura na câmara de combustão e a temperatura dos gases de exaustão foram análogas nos vários ciclos de combustão. Observou-se uma temperatura máxima nos gases de exaustão de 276 °C (Figura 4.29).

No segundo período de combustão observa-se a diminuição das temperaturas, iniciando-se a combustão do carbonizado, traduzida maioritariamente pela ausência de uma chama e pela redução considerável da massa de combustível na grelha.

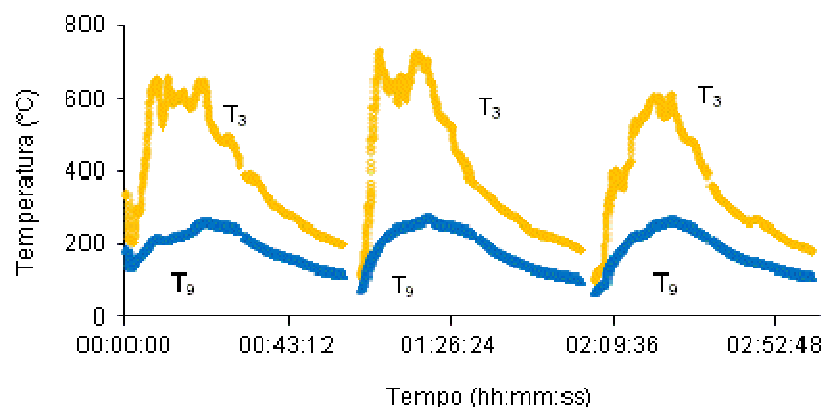


Figura 4.29 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com eucalipto (Legenda: T_3 - temperatura na câmara de combustão, T_9 - temperatura dos gases de exaustão).

Na Figura 4.30 observa-se que a temperatura na câmara de combustão variou na gama 100 a 750 °C, e a temperatura nos gases de exaustão variou de 100 a 300 °C.

Nos vários ciclos de combustão a relação entre a temperatura na câmara de combustão e a temperatura nos gases de exaustão foi semelhante, observando-se uma relação directa entre as temperaturas nas duas localizações.

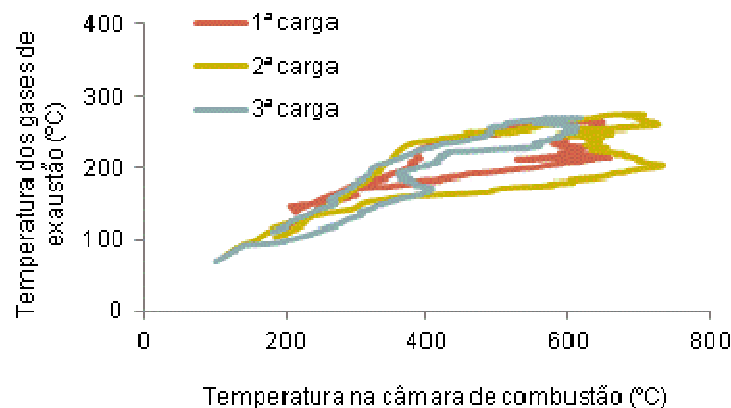


Figura 4.30 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com eucalipto.

O ciclo de combustão para a monitorização da evolução de temperaturas nos sete pontos estratégicos da instalação experimental teve uma duração equivalente à duração de um ciclo de combustão completo, correspondente a 1 hora e 26 minutos.

A temperatura do ar de convecção forçado (T_7) máxima ronda 100 °C (98,3 °C). Observa-se uma temperatura máxima acima da grelha (T_2) de cerca de 750 °C e uma temperatura máxima no topo da câmara de combustão (T_3) em torno de 700 °C (Figura 4.31).

A temperatura máxima dos gases de combustão à saída da conduta de exaustão (T_6) ronda os 250 °C. A temperatura do ar de combustão (T_1) ronda os 20 °C (ar interior fornecido à combustão)

À semelhança do efectuado no ciclo de combustão com azinheira é possível observar-se o perfil de temperaturas num ciclo de combustão completo. No primeiro período de combustão, correspondente a um maior consumo de biomassa, observam-se grandes oscilações de temperatura e temperaturas superiores, por outro lado, no segundo período observa-se o

decréscimo gradual de temperaturas, sem oscilações significativas, uma vez que se traduz na ausência de uma chama.

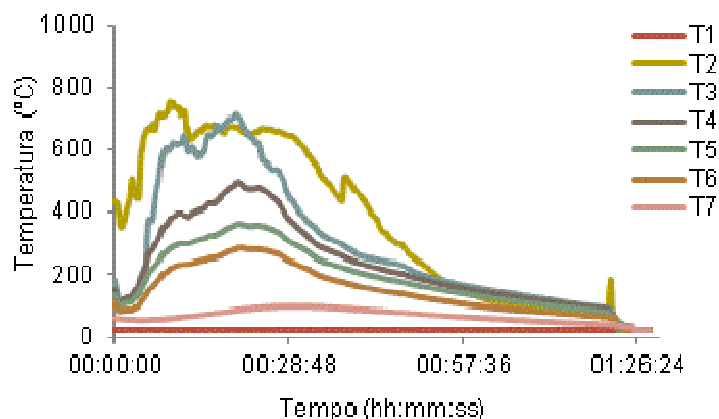


Figura 4.31 – Evolução de temperaturas num excerto de uma experiência com eucalipto (Legenda: T₁- temperatura do ar de combustão; T₂- temperatura na grelha; T₃- temperatura acima da grelha; T₄- temperatura à saída da câmara de combustão; T₅-temperatura após a conduta de isolamento térmico; T₆- temperatura à saída da chaminé e T₇- temperatura do ar de convecção forçado).

Observa-se um pico de concentração de CO durante o início do primeiro período de combustão, estando associado ao modo de ignição, como já foi referido. O pico de concentração de CO é de cerca de 9500 ppmv em gases secos, mais evidente no terceiro ciclo de combustão (Figura 4.32).

Durante o primeiro período de combustão observa-se a diminuição gradual da concentração de CO e de O₂. Em simultâneo, observa-se o aumento da concentração de CO₂, dado que, neste período a combustão se traduz pela presença de chama e de ar de combustão (oxidante) que agem na oxidação do CO a CO₂, assim como na oxidação de hidrocarbonetos inqueimados.

A disponibilidade de biomassa diminui, inicia-se o segundo período de combustão e a concentração de CO e de O₂ aumenta, pelo que se observa novo pico de concentração de CO, associado à combustão do carbonizado, na ausência de uma chama. Observa-se uma concentração de O₂ mais elevada na câmara de combustão, em torno de 21 % em gases secos. Por outro lado, no período de combustão do carbonizado a concentração de CO₂ diminui para valores na ordem de 2 % em gases secos.

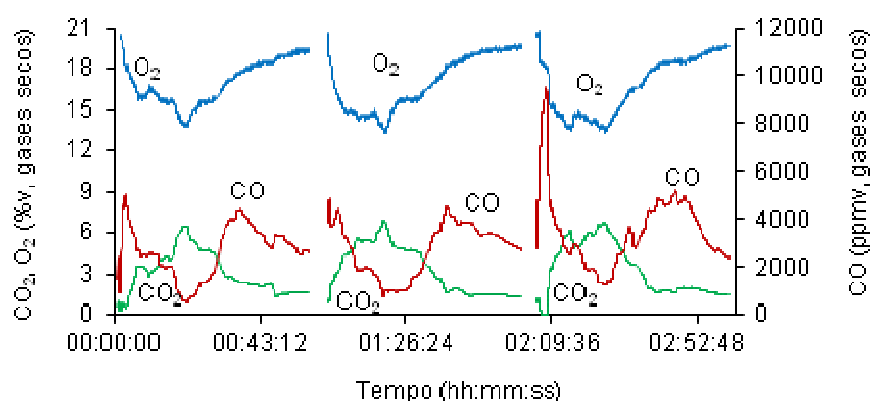


Figura 4.32 - Concentração de gases de exaustão, CO_2 , CO e O_2 , durante a combustão de eucalipto.

Na Figura 4.33 observaram-se concentração de CH_4 superiores durante o início do terceiro ciclo de combustão (cerca de 4000 ppmv), de igual modo por análise da Figura 4.32 observou-se um maior pico de CO neste ciclo, relacionando-se com uma taxa de pirólise superior à observada nos dois ciclos anteriores.

Na Figura 4.33 observa-se que no primeiro e segundo ciclos de combustão a chama activou-se imediatamente após o fecho da porta do fogão, possibilitando uma boa ignição.

Por outro lado, no terceiro ciclo de combustão a alimentação de uma carga ocorreu quando a temperatura na câmara de combustão rondava $150\text{ }^\circ\text{C}$, a baixa temperatura não permitiu a ignição imediata dos voláteis traduzindo-se numa taxa de pirólise superior, observada pela libertação de inqueimados.

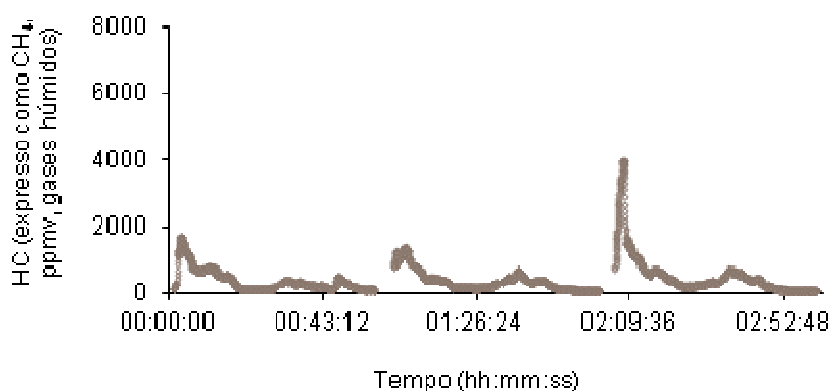


Figura 4.33 - Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de eucalipto.

4.3 EXPERIÊNCIAS COM COMBUSTÃO DE UMA RESINOSA

Nesta experiência de combustão o combustível utilizado foi o pinheiro bravo, por ser a espécie mais representativa da classe das resinosas. Foram efectuados três ciclos de combustão consecutivos de conjuntos de partículas. Na Tabela 4.8 encontra-se a massa de cada carga aplicada e a descrição física.

Tabela 4.8 - Massa de cada carga na experiencia de combustão com pinheiro bravo.

Carga	Massa de biomassa (kg)	Características das partículas carbonáceas
1ª	1,994	3 partículas com massa entre 500 e 600g e 1 com massa compreendida entre 200 e 300g
2ª	1,962	3 partículas com massa entre 500 e 600g e 1 com massa compreendida entre 200 e 300g
3ª	1,965	3 partículas com massa entre 500 e 600g e 1 com massa compreendida entre 200 e 300g

4.3.1 EXPERIÊNCIAS COM PINHEIRO BRAVO

Na Figura 4.34 observa-se uma evolução análoga da massa de biomassa na grelha nos vários ciclos de combustão.

Na Figura 4.34 observa-se um caudal volumétrico de ar de combustão idêntico no primeiro e segundo ciclos de combustão, rondando 30 Nm³/h. No terceiro ciclo de combustão observam-se maiores flutuações de caudal de ar de combustão.

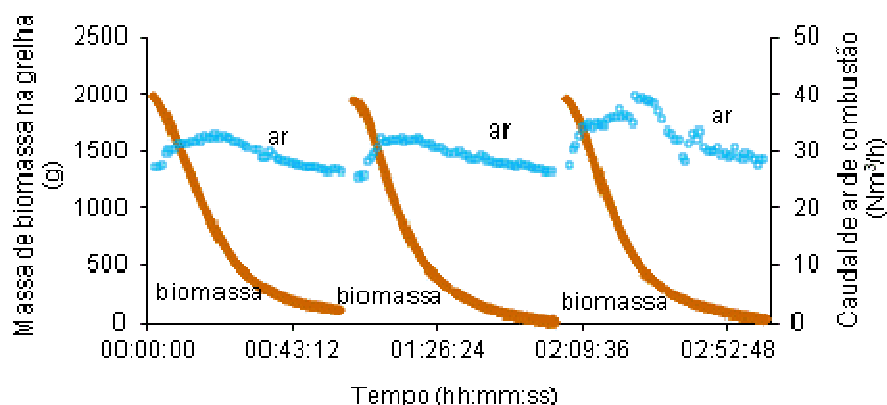


Figura 4.34 - Massa de biomassa e caudal volumétrico de ar de combustão durante a experiência com pinheiro bravo.

Na Figura 4.35 observa-se uma velocidade de consumo de biomassa pontual máxima de 5,5 kg/h, no segundo e terceiro ciclos de combustão. No entanto, tendo em conta todos os ciclos de combustão observa-se que a velocidade de consumo de biomassa pontual máxima varia na gama 4,5 a 5,5 kg/h.

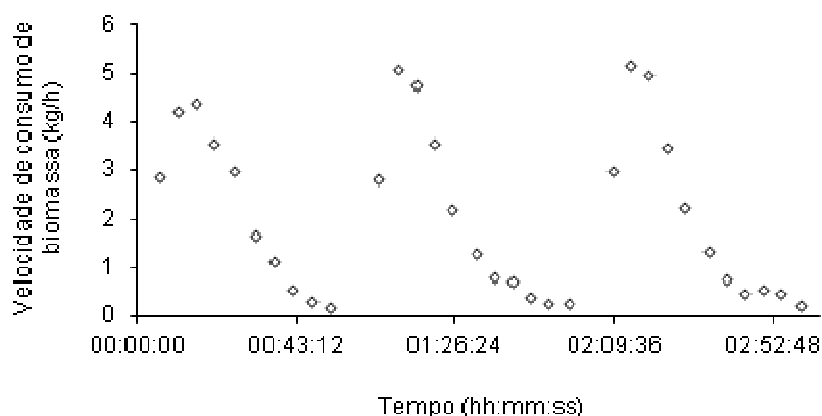


Figura 4.35 - Velocidade de consumo de biomassa durante a combustão de pinheiro bravo.

Na Tabela 4.9 observa-se que a velocidade de consumo de biomassa, num ciclo de combustão completo, foi superior no primeiro ciclo de combustão (2,01 kg/h), embora o pico de velocidade de consumo de biomassa pontual tenha sido observado no segundo ciclo de combustão.

A velocidade de consumo de biomassa global média foi de 1,96 kg/h. No primeiro período de combustão observou-se um valor superior de velocidade consumo de biomassa no terceiro ciclo de combustão (3,93 kg/h). No segundo período de combustão observou-se um valor inferior de velocidade de consumo de biomassa no segundo ciclo de combustão (0,49 kg/h).

O caudal volumétrico de ar de combustão médio rondou 30,58 Nm³/h, no entanto no terceiro ciclo de combustão observou-se um valor superior, correspondendo a 32,90 Nm³/h.

Tabela 4.9 – Velocidade média de consumo de biomassa (btq) e caudal volumétrico de ar de combustão, na experiência com pinheiro bravo.

Ciclo de combustão	Consumo global médio [kg/h]	Consumo na fase com chama [kg/h]	Consumo na fase de combustão do carbonizado [kg/h]	Caudal médio de ar [Nm ³ /h]
1º	2,01	3,46	0,74	29,78
2º	1,94	3,31	0,49	29,07
3º	1,94	3,93	0,73	32,90
Média	1,96	3,57	0,65	30,58

Na Figura 4.36 observa-se um caudal volumétrico de ar de combustão superior no terceiro ciclo de combustão, relacionando-se com as oscilações de temperatura observadas na câmara de combustão. Esta turbulência permitiu aumentar a mistura do ar de combustão com o combustível promovendo uma maior velocidade de consumo de biomassa neste ciclo, durante o primeiro período de combustão.

Observam-se temperaturas na câmara de combustão superiores no segundo ciclo de combustão, no entanto o consumo de biomassa não diferiu significativamente do observado nos restantes ciclos. Observam-se oscilações de temperatura mais significativas durante o primeiro período de combustão de um ciclo de combustão.

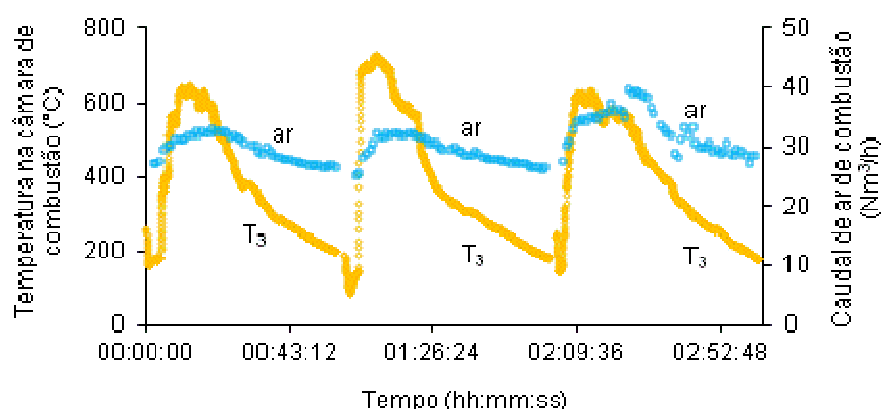


Figura 4.36 - Temperatura na câmara de combustão e caudal volumétrico de ar de combustão na experiência com pinheiro bravo.

Na Figura 4.37 observa-se um máximo de temperatura na câmara de combustão de 730 °C, após 15 minutos do início do primeiro período de combustão do segundo ciclo, relacionando-se com a maior velocidade de consumo de biomassa durante este período. Observa-se a diminuição de temperaturas à medida que o combustível é consumido, mais evidente no início do segundo período de combustão, pela extinção da chama. A temperatura dos gases de exaustão foi semelhante nos vários ciclos de combustão, tendo atingido um máximo de 297 °C.

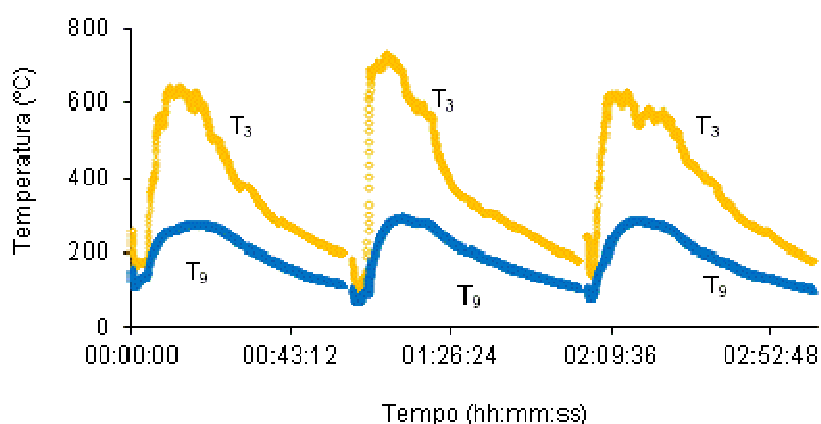


Figura 4.37 – Evolução de temperaturas na câmara de combustão e nos gases de exaustão durante a experiência com pinheiro bravo (Legenda: T_3 - temperatura na câmara de combustão, T_9 - temperatura dos gases de exaustão).

Na Figura 4.38 observa-se que a temperatura na câmara de combustão varia na gama 100 a 700 °C, e a temperatura dos gases de exaustão varia na gama 90 a 300 °C.

Observa-se uma relação directa entre a temperatura na câmara de combustão e a temperatura nos gases de exaustão. No entanto, o comportamento da relação entre as duas temperaturas foi diferente no segundo ciclo de combustão, se observaram valores de temperatura na câmara de combustão superiores ao observado nos restantes ciclos.

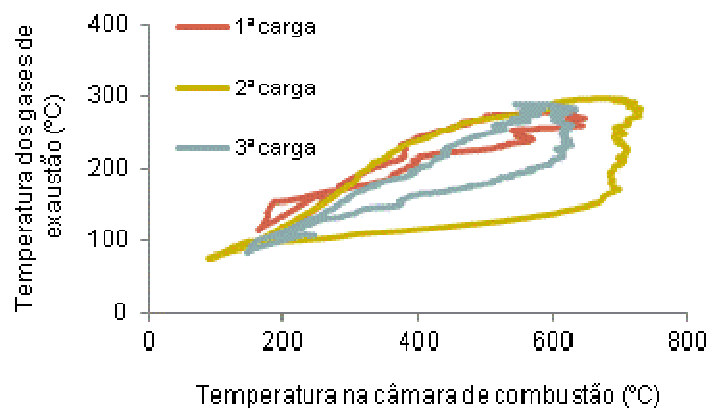


Figura 4.38 - Relação da temperatura na câmara de combustão com a temperatura dos gases de exaustão durante a experiência com pinheiro bravo.

O ciclo de combustão efectuado para monitorizar a evolução da temperatura nos sete pontos da instalação experimental durou cerca de 1 hora e 26 minutos. De modo semelhante ao realizado para os ciclos de combustão com azinheira e eucalipto este ciclo foi completo. Pela Figura 4.39 observa-se ainda o início de um segundo ciclo de combustão. Nos dois ciclos de combustão é possibilitada a observação de maiores oscilações de temperatura durante primeiro período de um ciclo de combustão.

A temperatura máxima acima da grelha (T_2) ronda os 800 °C e a temperatura máxima no topo da câmara de combustão (T_3) foi de 700 °C. A temperatura do ar de convecção forçado (T_7) varia na gama 80 a 100 °C, e a temperatura do ar de combustão (T_1) foi de 17,8 °C. A temperatura dos gases de exaustão varia na gama 100 a 390 °C (Figura 4.39).

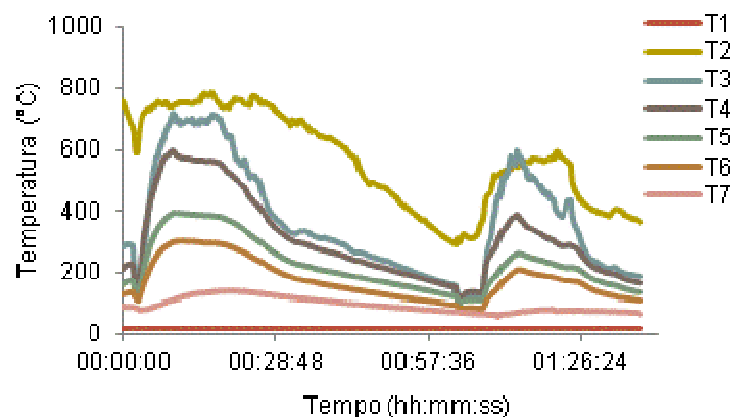


Figura 4.39 - Evolução de temperaturas num excerto de uma experiência com pinheiro bravo (Legenda: T₁- temperatura do ar de combustão; T₂- temperatura na grelha; T₃- temperatura acima da grelha; T₄- temperatura à saída da câmara de combustão; T₅-temperatura após a conduta de isolamento térmico; T₆- temperatura à saída da chaminé e T₇- temperatura do ar de convecção forçado).

Em termos de concentração de gases de combustão observa-se um comportamento semelhante nos vários ciclos de combustão.

Na Figura 4.40 observa-se o aumento da concentração de CO até à ocorrência de um pico de concentração durante o início do primeiro período de combustão, relacionando-se com a ignição do combustível. O pico de concentração de CO mais elevado foi observado no segundo ciclo de combustão, dado por cerca de 10000 ppmv. Apenas se observou um pico de concentração de CO significativo no primeiro e segundo ciclos de combustão.

No segundo período de combustão, com a extinção da chama e diminuição da massa de combustível na grelha, ocorre um incremento gradual da concentração de CO, atingindo novamente um pico em torno de 4000 ppmv em gases secos. Simultaneamente, observa-se a elevação da concentração de O₂ na câmara de combustão em torno de 18 % em gases secos (Figura 4.40).

No primeiro e segundo ciclos de combustão foram observados valores de caudal de ar de combustão inferiores possibilitando uma mistura ar-combustível insuficiente, por este motivo foi observada uma maior emissão de inqueimados em resultado da pirólise.

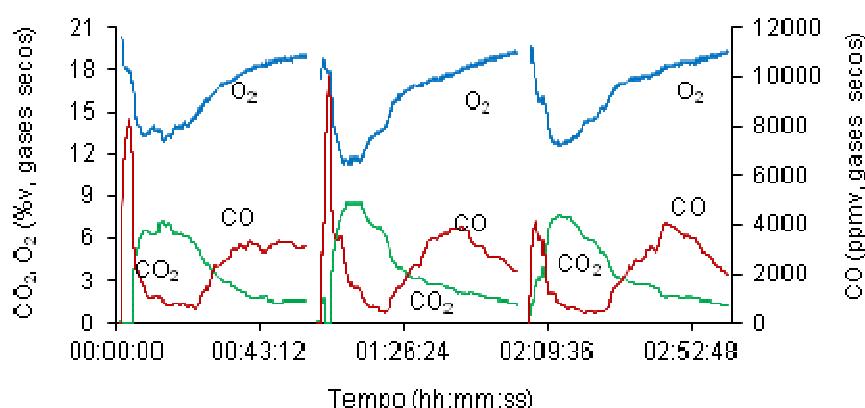


Figura 4.40 – Concentração de gases de exaustão, CO_2 , CO e O_2 , durante a combustão de pinheiro bravo.

Na Figura 4.41 observa-se uma concentração de hidrocarbonetos (CH_4) inferior no terceiro ciclo de combustão, correspondendo a uma menor concentração de CO no mesmo período (Figura 4.40). Como razão para uma menor taxa de pirólise tem-se a ignição rápida da mistura gasosa, e um caudal de ar de combustão superior.

Observou-se um valor superior de pico de concentração de CH_4 no segundo ciclo de combustão, cerca de 5200 ppmv em gases húmidos, tendo ocorrido em simultâneo com o pico de concentração de CO. No primeiro e terceiro ciclos de combustão observaram-se temperaturas na câmara de combustão e concentrações de inqueimados superiores, em resultado do processo de pirólise, e um consumo de biomassa global inferior (Figura 4.40 e Figura 4.41).

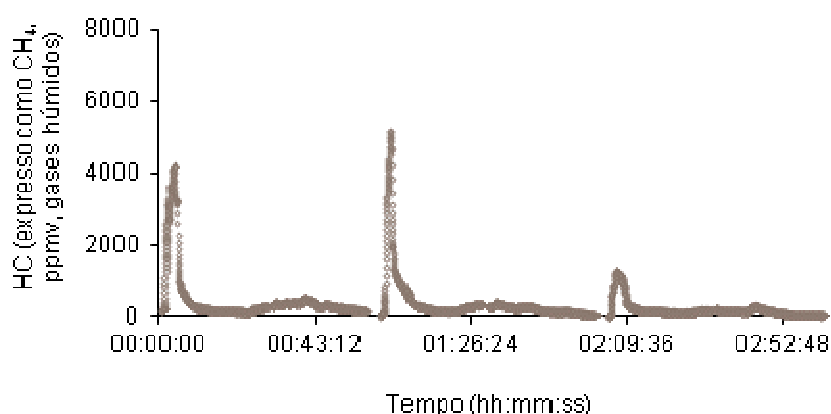


Figura 4.41 – Concentração de hidrocarbonetos durante a combustão de pinheiro bravo.

4.4 DESEMPENHO ENERGÉTICO DO FOGÃO

Nesta secção é realizado o balanço mássico e energético às experiências de combustão, de modo a determinar a eficiência térmica do fogão. Os balanços foram realizados considerando que em cada intervalo de 5 minutos o sistema se poderia aproximar como estando em estado estacionário.

A determinação dos balanços foi efectuada com base na monitorização das experiências de combustão (secção 4.2 e 4.3), dos quais, a massa de biomassa na grelha, o caudal volumétrico de ar de combustão, as temperaturas e a concentração de gases de combustão, assim como, na determinação da composição elementar e imediata dos vários tipos de madeira (secção 4.1).

4.4.1 BALANÇO MÁSSICO

Tomando os fluxos mássicos ao fogão, como entradas existe o combustível e o ar de combustão, à saída tem-se gases e partículas que escapam pela conduta de exaustão. O objectivo principal do balanço mássico é determinar por estequiometria o caudal molar (mol/s) de gases de combustão, incluindo vapor de água, O_2 , CO_2 , CO , HC (como CH_4) e N_2 .

Foram criadas simplificações ao método de cálculo, das quais:

- A composição elementar da biomassa considerou-se constante ao longo dos ciclos de combustão. Admitiu-se que o conteúdo de humidade do combustível foi sendo libertado de forma proporcional ao consumo de biomassa ao longo dos ciclos de combustão.
- O caudal volumétrico de gases de combustão na exaustão considerou-se igual ao caudal volumétrico de ar de combustão.
- As cinzas da grelha (escórias) e as cinzas volantes não são consideradas nos cálculos dos balanços (mássico e energético), ou seja, não se admite potência perdida pelo sistema nem potência introduzida no sistema associadas às cinzas.
- O balanço mássico e energético foi realizado considerando intervalos de tempo de 5 minutos, sendo considerados a composição dos gases de combustão, a temperatura na câmara de combustão e nos gases de exaustão, o consumo de biomassa, o caudal volumétrico de ar de combustão, calculados para valores médios nesses intervalos.

O conteúdo em vapor de água nos gases de combustão foi estimado por balanço mássico. Assim o cálculo do caudal molar de vapor de água foi determinado recorrendo à Equação 4.4. Esta equação reflecte as fontes da geração de vapor de água nos gases de exaustão, derivando do conteúdo em hidrogénio e em humidade na biomassa, assim como da humidade no ar de combustão.

$$n_{H_2O,R} \left[\frac{\text{kmol } H_2O}{\text{kg biomassa bs}} \right] = \frac{W_{HR}}{2} + \frac{W_{WR}}{18} + \frac{W_a}{32} \cdot W_{VA} \cdot \left[\frac{1}{y_{O_2}} \right] \cdot \left[\frac{M_{ar\ seco}}{18} \right] - n_{H_2,R} \quad \text{Equação 4.4}$$

Sendo $n_{H_2,R} = 0$, porque por motivos de simplificação, se pondera que todo o H_2 libertado durante a decomposição térmica da biomassa é oxidado.

Determinou-se a razão mássica de vapor de água no ar de combustão, W_{VA} , para tal considerou-se uma humidade média do ar de 45 % e uma temperatura ambiente de 20 °C. Através do digrama psicrométrico obteve-se **0,0068** kg água/kg ar seco de combustão. Foi necessário ainda, estimar a razão mássica de oxigénio estequiométrico (W_s) pela Equação 4.5.

$$W_s \left[\frac{\text{kg } O_2 \text{ estequiométrico}}{\text{kg biomassa bs}} \right] = 32 \cdot \left[y_{s,C} \cdot \frac{W_{CR}}{12} + y_{s,H} \cdot \frac{W_{HR}}{1} + y_{s,S} \cdot \frac{W_{SR}}{32} - \frac{W_{OR}}{32} \right] \quad \text{Equação 4.5}$$

Sendo $y_{s,C} = 1$ kmol estequimétrica de O_2 /kmol estequimétrica de C, $y_{s,H} = 0,25$ kmol estequimétrica de O_2 /kmol estequimétrica de H e $y_{s,S} = 1$ kmol estequimétrica de O_2 /kmol estequimétrica de S. E W_{CR} , W_{HR} , W_{SR} e W_{OR} , respectivamente as razões mássicas em carbono, hidrogénio, enxofre e oxigénio, na biomassa em base seca.

A razão mássica em oxigénio estequiométrico é apresentada na Tabela 4.10, para cada tipo de biomassa, dado que depende da composição elementar.

Tabela 4.10 – Valores estimados para a razão de oxigénio estequiométrico por massa de biomassa (bs).

	Sobreiro	Pinheiro bravo	Azinheira	Carvalho negral	Eucalipto
Ws (kg O₂ estequiométrico/ kg biomassa bs)	1,471	1,448	1,286	1,278	1,349

A razão estequiométrica em oxigénio actual (**W_a**) foi estimada para intervalos de 5 minutos, pela Equação 4.6.

$$W_a \left[\frac{\text{kg O}_2 \text{ actual}}{\text{kg biomassa bs}} \right] = \frac{P [\text{Pa}] \cdot W'_a}{R \left[\frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{mol K}} \right] \cdot T [\text{K}]} \cdot M_{\text{O}_2} \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} \quad \text{Equação 4.6}$$

Sendo **W'_a** dado por:

$$W'_a \left[\frac{\text{Nm}^3 \text{ O}_2 \text{ actual}}{\text{kg biomassa bs}} \right] = \frac{G_v \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right] \cdot y_{\text{O}_2} \cdot [1 - y_v]}{\text{Consumo de biomassa} \left[\frac{\text{kg biomassa bs}}{\text{s}} \right]} \quad \text{Equação 4.7}$$

A fracção de oxigénio no ar atmosférico (**y_{O₂}**) é dada por 0,21 e a fracção de vapor no ar húmido (**y_v**) é determinada pela Equação 4.8.

$$y_v = \frac{\frac{W_{VA}}{M_v}}{\frac{W_{VA}}{M_v} + \frac{1}{M_{\text{ar seco}}}} \quad \text{Equação 4.8}$$

Na secção 4.2 tem-se a determinação dos valores médios da velocidade de consumo de biomassa para intervalos de 5 minutos, em base tal e qual, sendo necessário converte-los em base seca pela Equação 4.9.

$$\text{Consumo de biomassa} \left[\frac{\text{kg biomassa bs}}{\text{s}} \right] = \text{Consumo de biomassa} \left[\frac{\text{kg biomassa btq}}{\text{h}} \right] \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot [1 - W_{\text{WR}}]$$

Equação 4.9

Pela Equação 4.10 obtém-se o caudal molar de vapor de água ($G_{\text{m H}_2\text{O}}$, mol/ s), que resulta da multiplicação da velocidade de consumo de biomassa (kg biomassa bs/ s) pelo número de moles de H₂O por massa de biomassa em base seca (mol H₂O/kg biomassa bs).

$$G_{\text{m H}_2\text{O}} \left[\frac{\text{mol H}_2\text{O}}{\text{s}} \right] = n_{\text{H}_2\text{O,R}} \left[\frac{\text{kmol H}_2\text{O}}{\text{kg biomassa bs}} \right] \cdot \frac{1 \text{ mol}}{10^3 \text{ kmol}} \cdot \text{Consumo de biomassa} \left[\frac{\text{kg biomassa bs}}{\text{s}} \right]$$

Equação 4.10

Para calcular o caudal molar de gases húmidos (G_{m}) considerara-se o caudal volumétrico médio de ar de combustão (G_{v} , Nm³/h) em cada intervalo, aplicado na equação dos gases perfeitos ($PV=nRT$), como indicado na Equação 4.11.

$$G_{\text{m}} \left[\frac{\text{mol gases húmidos}}{\text{s}} \right] = \frac{P [\text{Pa}] \cdot G_{\text{v}} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right]}{R \left[\frac{\text{m}^3 \text{ Pa}}{\text{mol K}} \right] \cdot T [\text{K}]}$$

Equação 4.11

Onde P é a pressão normal ($1,01325 \times 10^5$ Pa), R é a constante dos gases perfeitos ($8,314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa} / \text{mol} \cdot \text{K}$) e T é a temperatura de referência (273 K).

Calculou-se a fracção molar de H₂O em gases húmidos ($y_{\text{H}_2\text{O}}$) fazendo o quociente entre o caudal molar de água ($G_{\text{m H}_2\text{O}}$) e o caudal molar de gases húmidos (G_{m}).

A composição dos gases de combustão (CO₂, CO, O₂ e CH₄) baseou-se nas medições experimentais. A fracção de CH₄ uma vez que a concentração medida já se encontra em gases húmidos obteve-se a partir da concentração de forma directa. De modo semelhante, determinou-se a fracção de gases de combustão CO, CO₂ e O₂, mas em termos de gases secos. Foi necessário converter as fracções de CO, CO₂ e O₂, de gases secos para gases húmidos pela Equação 4.12.

Sendo que i representa os gases de combustão O₂, CO₂, CO e CH₄ e $y_{\text{H}_2\text{O}}$ é a fracção de H₂O nos gases húmidos.

$$y_i \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol gases húmidos}} \right] = y'_i \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol gases secos}} \right] \cdot \left[1 - y_{\text{H}_2\text{O}} \left[\frac{\text{mol H}_2\text{O}}{\text{mol gases húmidos}} \right] \right] \quad \text{Equação 4.12}$$

A fracção de N_2 nos gases de combustão húmidos foi estimada por diferença entre 1 e as fracções molares de CO_2 , CO , O_2 , CH_4 e H_2O , em gases húmidos.

Obtém-se o caudal molar de gases de combustão (CO_2 , CO , O_2 , CH_4 e H_2O) em gases húmidos pela Equação 4.13. Sendo, G_m o caudal molar de gases húmidos, e i representa cada gás de combustão.

$$G_{m_i} \left[\frac{\text{mol } i}{\text{s}} \right] = y_i \left[\frac{\text{mol } i}{\text{mol gases húmidos}} \right] \cdot G_m \left[\frac{\text{mol gases húmidos}}{\text{s}} \right] \quad \text{Equação 4.13}$$

4.4.2 BALANÇO ENERGÉTICO

No balanço energético a energia útil efectiva resulta da diferença entre a energia dos reagentes e a energia dos produtos, ou seja entre a energia introduzida no sistema e a energia perdida pelo sistema.

$$\Delta H_{\text{útil}} = \Delta H_{\text{reagentes}} - \Delta H_{\text{produtos}} \quad \text{Equação 4.14}$$

A entalpia associada aos reagentes envolve o calor sensível, o calor latente e o calor de reacção dos reagentes. A energia latente dos reagentes é a energia consumida, ao longo do processo de combustão, na evaporação da humidade contida no combustível.

$$\Delta H_{\text{reagentes}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg biomassa bs}} \right] = [\Delta H_{\text{Sensível}} + \Delta H_{\text{reacção}} - \Delta H_{\text{Latente}}] \quad \text{Equação 4.15}$$

A determinação do calor sensível dos reagentes é dada pela Equação 4.16. O calor sensível associado às cargas de combustível não é considerado, apenas se admite o calor sensível

associado ao ar de combustão, durante cada ciclo, dado que a entrada de ar de combustão é contínua.

$$\text{Calor sensível dos reagentes} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = [W_{\text{AR}} \cdot [C_{p_{\text{ar}}} + W_{\text{VA}} \cdot C_{p_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})}}] [T_{\text{A}} - T^{\circ}]] \cdot \text{Consumo de biomassa}$$

Equação 4.16

A temperatura de referência (T°) corresponde a 273 K e a temperatura T_{A} corresponde à temperatura do ar de combustão (ar interior admitido à câmara de combustão). Foi efectuado um ciclo de combustão, à parte, para monitorização da evolução da temperatura em sete pontos da instalação experimental, que permitiu a determinação de um valor médio da temperatura ambiente no laboratório (T_{A}) para cada experiência de combustão.

A capacidade calorífica dos reagentes, ar de combustão ($C_{p_{\text{ar}}}$) e vapor de água admitido à câmara ($C_{p_{\text{H}_2\text{O}(\text{g})}}$), são estimadas para a temperatura ambiente média (T_{A}). As capacidades caloríficas médias dos gases de combustão são estimadas na gama entre a temperatura de referência e a temperatura dos gases de exaustão, para médias de 5 minutos, pela Equação 4.17.

$$\bar{C}_{p_i}[T] = \frac{1}{T - T^{\circ}} \int_{T^{\circ}}^T C_{p_i}[T] dt \quad \text{Equação 4.17}$$

A razão estequiométrica de ar seco actual (W_{AR}) é calculada pela Equação 4.18. Sendo M_{ar} a massa molar de ar seco, y_{O_2} a fracção molar de oxigénio no ar seco e M_{O_2} a massa molar de oxigénio.

$$W_{\text{AR}} \left[\frac{\text{kg ar seco actual}}{\text{kg biomassa bs}} \right] = \left[\frac{M_{\text{ar}}}{y_{\text{O}_2} \cdot M_{\text{O}_2}} \right] \cdot W_{\text{a}} = 4,29 \cdot W_{\text{a}} \quad \text{Equação 4.18}$$

O calor latente associado aos reagentes é dado pela Equação 4.19. Sendo que, o calor latente de vaporização da água ($h_{\text{wv}, T^{\circ}}$) corresponde a **-2440 kJ/ kg** de água, a 25 °C.

$$\text{Calor latente dos reagentes} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = W_{\text{WR}} \cdot h_{\text{wv}, T^{\circ}} \cdot \text{Consumo de biomassa} \quad \text{Equação 4.19}$$

O calor de reacção dos reagentes é designado pelo calor associado ao combustível sólido, ou seja à energia que pode ser libertada, sob a forma de calor, durante a sua oxidação, em resultado do poder calorífico inferior da biomassa (Equação 4.20).

$$\text{Calor de reacção dos reagentes} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = \text{PCI}_R \cdot \text{Consumo de biomassa} \quad \text{Equação 4.20}$$

A entalpia dos produtos é dada pela soma do calor sensível, calor latente e calor de reacção associados aos gases de exaustão, pelas questões de simplificação já expostas.

$$\Delta H_{\text{produtos}} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg biomassa bs}} \right] = [\Delta H_{\text{Sensível}} + \Delta H_{\text{reacção}} + \Delta H_{\text{Latente}}] \quad \text{Equação 4.21}$$

O calor sensível dos gases de exaustão é determinado segundo a Equação 4.22. Sendo Gm_i o caudal molar do gás de combustão i , \bar{Cp}_i a capacidade calorífica de cada gás e M_i a massa molar de cada gás ($M_{CO_2} = 0,044$ kg/mol; $M_{O_2} = 0,032$ kg/mol; $M_{N_2} = 0,028$ kg/mol; $M_{H_2O} = 0,018$ kg/mol; $M_{CO} = 0,028$ kg/mol e $M_{CH_4} = 0,016$ kg/mol).

$$\text{Calor sensível dos gases de exaustão} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = \sum [Gm_i \cdot M_i \cdot \bar{Cp}_i] \cdot [T_9 - T^\circ] \quad \text{Equação 4.22}$$

O calor de reacção dos gases de exaustão resulta do calor associado aos gases inqueimados, CO e CH₄. Sendo que j representa cada gás de combustão inqueimado.

$$\text{Calor de reacção dos gases de exaustão} \left[\frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right] = \sum n_{j,R} \cdot M_j \cdot \text{PCI}_j \quad \text{Equação 4.23}$$

Os poderes caloríficos inferiores dos gases inqueimados encontram-se na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Poder calorífico dos gases inqueimados, CO e CH₄.

	CO	CH ₄
Poder Calorífico Inferior (kJ/ kg)	10120	50120

Por fim, o calor latente dos produtos é admitido como nulo, porque se considera que a condensação dos gases de exaustão é evitada na combustão.

4.4.3 EFICIÊNCIA TÉRMICA DO FOGÃO

A eficiência de conversão energética é um parâmetro relevante por permitir tirar conclusões quanto à influência do combustível no desempenho energético do equipamento de combustão doméstica. Para cada espécie de biomassa lenhosa foi estimada a potência térmica perdida pela condução de exaustão, a potência introduzida pela biomassa e pelo ar de combustão, a potência efectivamente útil à produção de ar quente (potência do equipamento) e a eficiência de conversão energética do equipamento.

4.4.3.1 EXPERIÊNCIAS COM SOBREIRO

A potência perdida pelo sistema resulta da soma do calor arrastado pelos gases de exaustão incluindo o calor de vaporização da humidade contida na biomassa. Portanto, a potência perdida pela condução de exaustão é determinada pelo somatório do calor latente associado à vaporização da água contida na biomassa, do calor sensível associado aos gases de combustão e do calor de reacção associados gases de combustão inqueimados (Equação 4.24).

Potência perdida nos gases de exaustão [kW]

$$= \text{Calor sensível dos gases de exaustão} + \text{Calor de reacção dos gases de exaustão} \\ + \text{Calor latente dos reagentes}$$

Equação 4.24

A potência introduzida no sistema foi determinada segundo a Equação 4.25. Consiste na soma do calor sensível com o calor de reacção dos reagentes. Isto é, a potência introduzida no sistema

resulta da soma da potência associada ao ar de combustão com a potência associada ao poder calorífico da biomassa.

$$\text{Potência introduzida [kW]} = \text{Calor sensível dos reagentes} + \text{Calor de reacção dos reagentes}$$

Equação 4.25

A potência útil consiste no calor que é efectivamente aproveitado para a produção de ar quente, ou seja, a potência útil é a potência do equipamento de combustão e resulta da diferença entre a energia introduzida e a energia perdida pelo sistema. Traduzindo-se na energia excedente resultante do processo de combustão, deixando de existir excedente no momento em que a energia perdida pelo sistema supera a energia introduzida no sistema.

$$\text{Potência útil [kW]} = \text{Potência introduzida} - \text{Potência perdida nos gases de exaustão}$$

Equação 4.26

Na Figura 4.42 observa-se que a potência perdida nos gases de exaustão variou na gama 1,6 a 3,8 kW_{th}, tendo-se obtido um valor médio de 2,7 kW_{th}. Por outro lado, a potência introduzida no sistema atingiu um máximo de 21,5 kW_{th} durante o primeiro período de combustão e um mínimo de 1,2 kW_{th} durante o segundo período de combustão, portanto em termos médios determinou-se uma potência de 10,0 kW_{th}. A potência útil variou na gama 0,4 kW_{th} a 18,2 kW_{th}, em termos médios determinou-se 7,3 kW_{th}. Na generalidade a potência do equipamento encontra-se na gama observada na literatura. Em suma, durante o primeiro período de combustão, obtêm-se potências (introduzidas, perdidas e úteis) superiores às observadas durante o segundo período.

Observam-se dois períodos em cada ciclo de combustão, no primeiro período, caracterizado pela presença de uma chama observam-se potências elevadas, no segundo período caracterizado pela combustão do carbonizado e pela ausência de uma chama.

No segundo período de combustão observa-se uma proximidade significativa entre a potência introduzida e a potência perdida pelo sistema, pelo que as perdas de energia podem superar a energia introduzida no sistema. Este comportamento deve-se ao facto do fogão encontra-se em arrefecimento durante este período.

Durante o primeiro período de combustão, no qual se observam temperaturas na câmara de combustão e velocidades de consumo de biomassa superiores, obtêm-se maiores potências térmicas, e por conseguinte maiores perdas térmicas associadas, em relação ao segundo período de combustão.

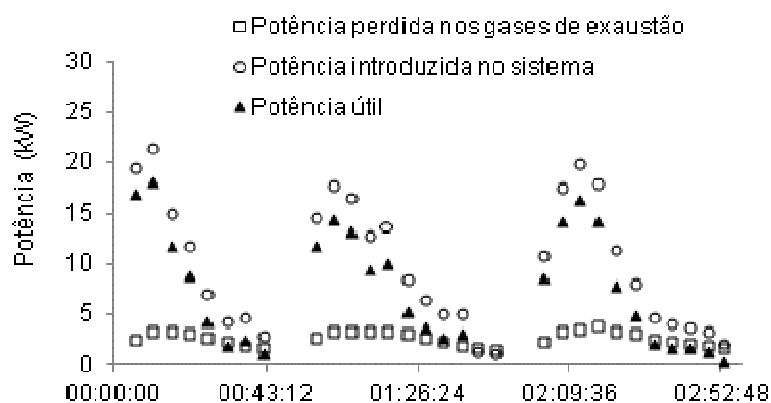


Figura 4.42 – Perfil de potências na experiência de combustão com sobreiro.

A eficiência de conversão energética do equipamento depende da biomassa combustível e é determinada pelo quociente entre a potência útil e a potência introduzida no sistema.

$$\text{Eficiência energética do equipamento [\%]} = \frac{\text{Potência útil}}{\text{Potência introduzida no sistema}} \cdot 100$$

Equação 4.27

Na Figura 4.43 observam-se maiores valores de eficiência energética durante o período de maiores temperaturas na câmara de combustão. O valor mais elevado de eficiência de conversão energética foi observado no primeiro ciclo de combustão, correspondendo a 87,0 %. Este ciclo é caracterizado por uma menor temperatura na câmara de combustão, uma maior velocidade de consumo de biomassa global e pontual, e um processo de pirólise menos significativo, em relação aos restantes ciclos de combustão.

A eficiência de conversão energética variou na gama 19,2 a 87,0 %. A nível médio a eficiência foi estimada em 64,7 %.

Ao nível da combustão doméstica pretende-se uma combustão eficiente dado que a finalidade é a produção de ar quente, como tal não se permite um arrefecimento tão acentuado como o efectuado neste estudo. Ou seja, em combustão doméstica, logo que se inicia o período de combustão de carbonizado é aplicada uma nova carga combustível.

Na fase final do segundo período de combustão observou-se uma maior proximidade entre os valores de potência perdida e de potência introduzida no sistema, causando problemas de interpretação, assim sendo, para simplificação removeram-se os valores de eficiência inferiores a 10 % em todas as experiências de combustão.

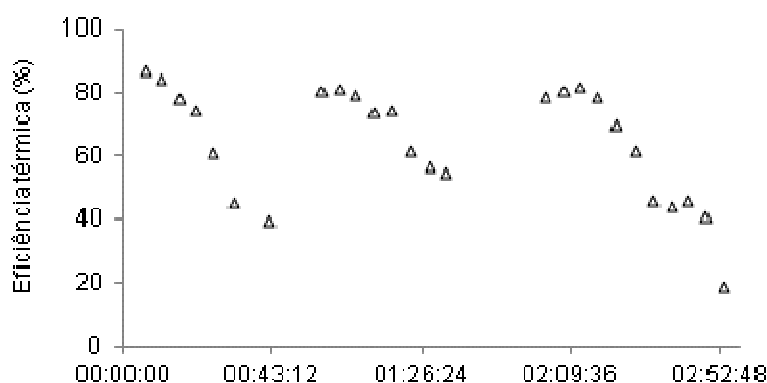


Figura 4.43 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com sobreiro.

4.4.3.2 EXPERIÊNCIAS COM CARVALHO NEGRAL

A determinação das potências e da eficiência de conversão energética foi obtida de igual modo ao efectuado para o sobreiro.

Na Figura 4.44 observou-se um valor superior de potência perdida nos gases de exaustão durante o segundo ciclo de combustão, de cerca de $4,5 \text{ kW}_{\text{th}}$. A potência perdida nos gases de exaustão variou na gama $0,69$ a $4,5 \text{ kW}_{\text{th}}$, e obteve-se um valor médio de $2,5 \text{ kW}_{\text{th}}$. No segundo ciclo de combustão foi determinado um valor superior de potência introduzida no sistema de $20,1 \text{ kW}_{\text{th}}$. A potência introduzida mínima foi de $0,42 \text{ kW}_{\text{th}}$, e a potência introduzida média de $9,1 \text{ kW}_{\text{th}}$.

Observou-se um valor superior de potência útil do equipamento durante o segundo ciclo de combustão, dado por $15,7 \text{ kW}_{\text{th}}$. A potência útil variou na gama $0,03$ a $15,7 \text{ kW}_{\text{th}}$, e determinou-se um valor médio de $6,6 \text{ kW}_{\text{th}}$.

Observam-se potências inferiores durante o primeiro ciclo de combustão. De forma complementar a temperatura na câmara de combustão foi ligeiramente superior neste ciclo de combustão e observaram-se picos de concentração de inqueimados inferiores, relacionando-se com um processo de pirólise menos significativo que nos restantes ciclos de combustão.

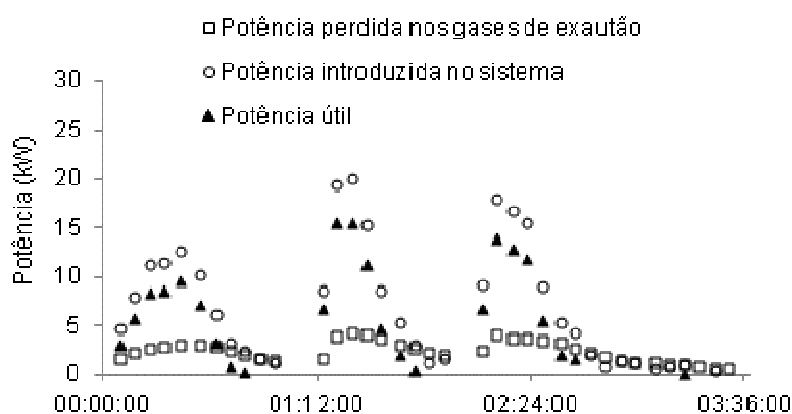


Figura 4.44 - Perfil de potências na experiência de combustão com carvalho negral.

Na Figura 4.45 observa-se um valor máximo de eficiência de conversão energética do fogão de cerca de 80,1 %. O valor médio de eficiência foi de 60,4 %. Na generalidade, a eficiência de combustão variou na gama 11,8 a 80,1 %.

Não se observam diferenças significativas de eficiência térmica nos vários ciclos de combustão.

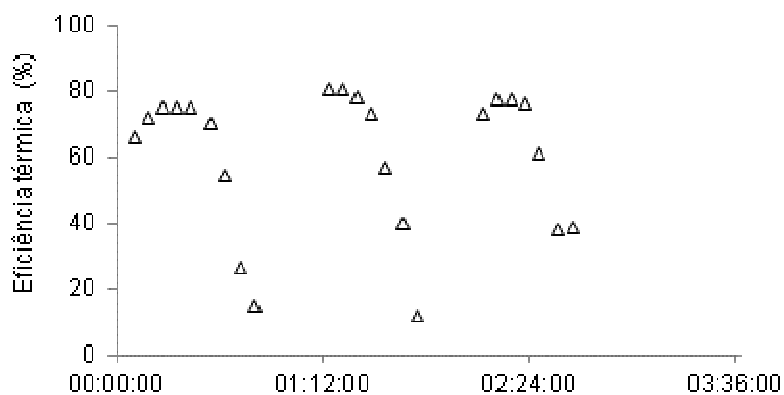


Figura 4.45 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com carvalho negral.

4.4.3.3 EXPERIÊNCIAS COM AZINHEIRA

Na Figura 4.46 observam-se valores superiores de potência no terceiro e quarto ciclos de combustão, em relação aos restantes ciclos. No primeiro período de combustão são observados maiores valores de potência.

A potência introduzida média foi de $9,6 \text{ kW}_{\text{th}}$, e em termos globais variou na gama 0,4 a $21,0 \text{ kW}_{\text{th}}$. A potência útil do equipamento variou entre 0,01 e $17,1 \text{ kW}_{\text{th}}$, encontrando-se na gama de valores da literatura. Determinou-se um valor médio de potência útil de $7,2 \text{ kW}_{\text{th}}$.

A potência perdida pelo sistema, considerando os quatro ciclos de combustão, variou na gama 0,9 a $4,2 \text{ kW}_{\text{th}}$ e em termos médios foi de $2,4 \text{ kW}_{\text{th}}$.

Observa-se que na fase final do segundo período de combustão a potência perdida nos gases de exaustão foi muito semelhante à potência introduzida no sistema, em resultado do arrefecimento do fogão, no qual a energia perdida supera a energia útil.

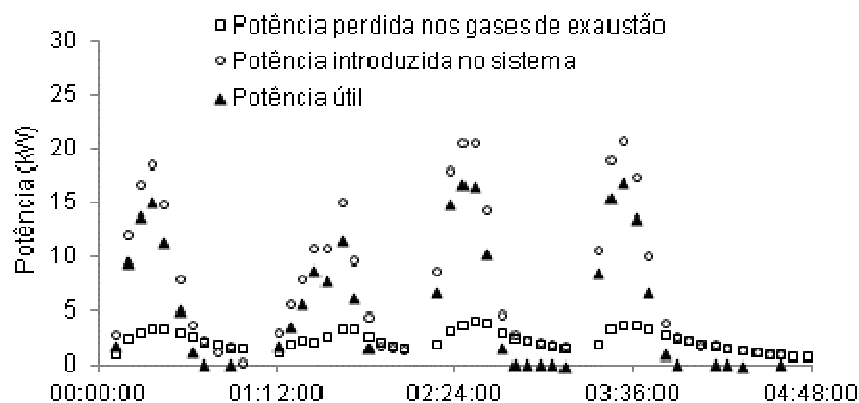


Figura 4.46 - Perfil de potências na experiência de combustão com azinheira.

Pela Figura 4.47 observa-se que a eficiência de conversão energética durante os ciclos de combustão variou na gama 27,3 a 82,1 %. A eficiência térmica média foi de 68,4 %.

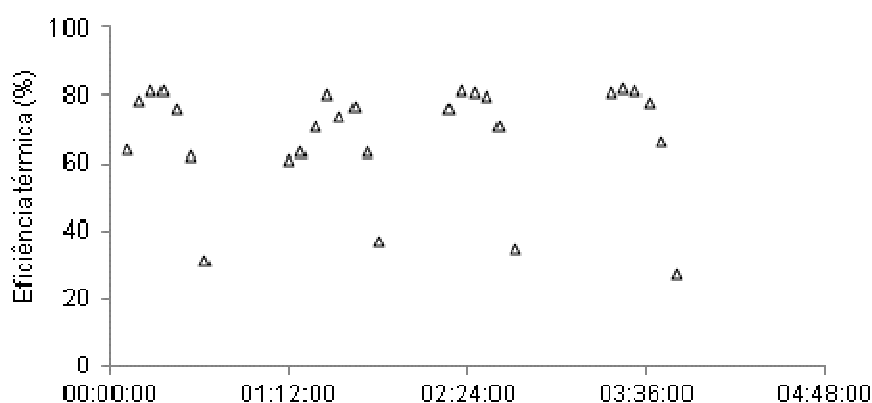


Figura 4.47 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com azinheira.

4.4.3.4 EXPERIÊNCIAS COM EUCALIPTO

Na Figura 4.48 observa-se que o perfil de potências nos vários ciclos de combustão foi semelhante. A potência perdida nos gases de exaustão variou na gama 1,4 a 4,2 kW_{th} , ao passo que a potência introduzida no sistema variou na gama 0,5 a 19,3 kW_{th} . Considerando os ciclos de combustão determinou-se uma potência introduzida média de 9,6 kW_{th} e uma potência perdida média de 2,9 kW_{th} . A potência útil do equipamento variou na gama 1,1 a 16,1 kW_{th} , estando na gama da literatura para este tipo de equipamento. Determinou-se um valor médio de potência útil de 6,7 kW_{th} .

À semelhança do analisado anteriormente, observa-se que o fogão se encontra em arrefecimento na fase final do segundo período de combustão.

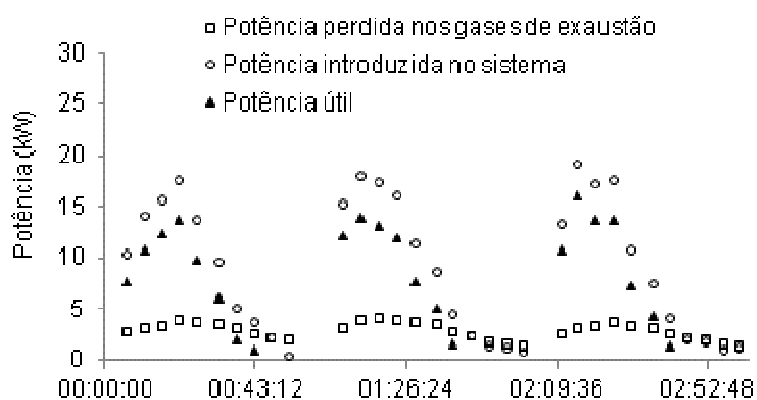


Figura 4.48 - Perfil de potências na experiência de combustão com eucalipto.

Na Figura 4.51 observa-se que a eficiência de conversão energética variou na gama 30,2 a 83,6 %, tendo-se determinado um valor médio de 66,5 %.

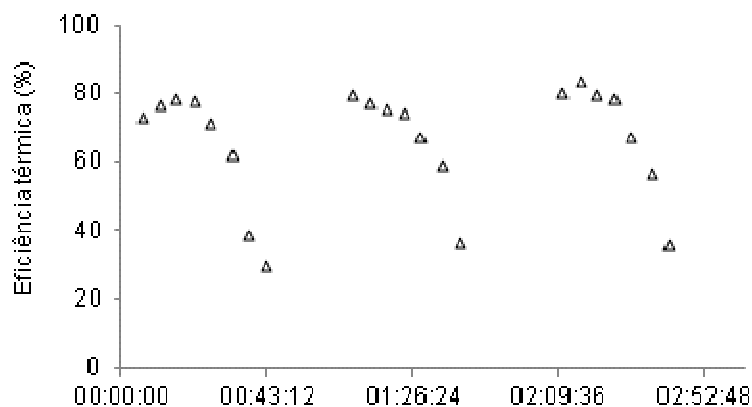


Figura 4.49 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com eucalipto.

4.4.3.5 EXPERIÊNCIAS COM PINHEIRO BRAVO

Na Figura 4.50 observam-se valores de potência superiores durante o segundo e terceiro ciclos de combustão. No segundo ciclo de combustão observaram-se temperaturas na câmara de combustão e concentrações de inqueimados superiores, observando-se o inverso no terceiro ciclo de combustão, ou seja temperaturas na câmara de combustão e concentrações de inqueimados inferiores, em relação ao segundo ciclo de combustão. De modo complementar, no segundo e terceiro ciclos de combustão observaram-se velocidades de consumo de biomassa pontuais superiores, relativamente ao primeiro ciclo.

A potência introduzida no sistema variou na gama 1,1 a 23,2 kW_{th} e em termos médios foi de 9,7 kW_{th}. A potência útil variou na gama 0,4 a 19,2 kW_{th}, encontrando-se na gama da literatura para este tipo de equipamento. Determinou-se um valor médio para a potência útil de 6,8 kW_{th}.

A potência perdida nos gases de exaustão foi semelhante nos vários ciclos de combustão, variando na gama 1,5 a 4,3 kW_{th}. O valor médio de potência perdida pela conduta de exaustão foi de 2,9 kW_{th}.

Observa-se que no período de combustão do carbonizado a potência perdida pelo sistema é superior à potência introduzida, em resultado do arrefecimento do fogão, como já foi referido.

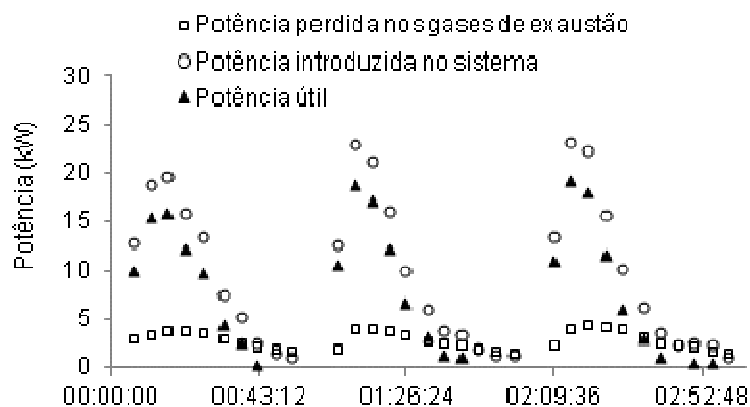


Figura 4.50 - Perfil de potências na experiência de combustão com pinheiro bravo.

Na Figura 4.51 observa-se que eficiência de conversão energética variou entre 14,3 e 83,7 %, tendo-se determinado um valor médio de 60,9 %. O perfil de eficiências foi semelhante nos três ciclos de combustão.

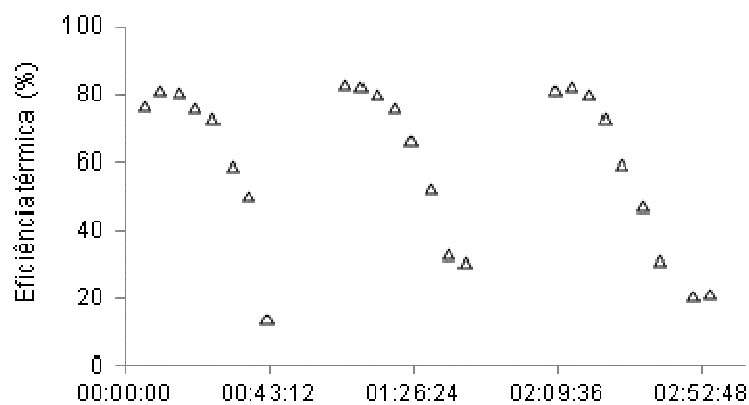


Figura 4.51 - Eficiência térmica do fogão na experiência de combustão com pinheiro bravo.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta secção são apresentadas algumas comparações entre a combustão de diferentes tipos de biomassa de folhosas e resinosas num fogão doméstico destinado à produção de ar quente.

Analisando as características do combustível observa-se que ao nível da composição elementar não existem diferenças significativas. O conteúdo em humidade é relativamente idêntico para os vários tipos de madeira, estando na gama de 8 a 10 % (btq). Em oposição, observa-se uma maior diferença ao nível do conteúdo em cinzas. A madeira de azinheira e de sobreiro revela um conteúdo médio em cinzas superior, respectivamente 4,33 %btq e 3,04 %btq. A madeira de pinheiro bravo apresenta um conteúdo médio em cinza inferior (0,33 %btq). Um maior conteúdo em cinzas na biomassa pode relacionar-se com uma maior produção de cinzas durante a combustão. Na generalidade, a combustão de madeira de folhosas contribui para uma maior produção de cinzas.

O tipo de madeira com maior conteúdo em matéria volátil foi o carvalho negral (87,35 %btq) e o eucalipto (85,48 %btq) e observou-se um conteúdo inferior na amostra de pinheiro bravo (81,25 %btq). O conteúdo em carbono fixo foi superior no pinheiro bravo (26,02 %btq) e inferior no carvalho negral (9,09 %btq). O conteúdo em matéria volátil e em carbono fixo no carvalho negral diferiu em relação aos valores da literatura, permitindo antever que poderão ter ocorrido alguns erros durante o método utilizado para a determinação da matéria volátil, dado que durante este processo não ocorreu apenas libertação de matéria volátil mas também oxidação de uma percentagem de carbono fixo contido na amostra.

Determinaram-se valores superiores de poder calorífico para a madeira de sobreiro, pinheiro bravo e eucalipto, tendo-se observado que este parâmetro tem influência na velocidade de consumo de biomassa.

Cada ciclo de combustão apresentou uma duração na gama de 50 minutos a 1 hora e 30 minutos. Num ciclo de combustão observam-se dois períodos de combustão principais, o primeiro período é caracterizado por uma velocidade de consumo de biomassa superior, e pela presença de chama intensa e turbulenta, o segundo período é caracterizado por uma menor velocidade de consumo de biomassa e pela ausência de uma chama. Considerando as experiências de combustão dos diferentes tipos de madeira a velocidade de consumo de biomassa média num ciclo de combustão completo variou na gama 1,86 a 1,96 kg/h. Em termos de consumo de biomassa pontual, ou seja

determinado para um intervalo de 5 minutos, pela análise das experiências de combustão foi possível verificar um valor superior na combustão de pinheiro bravo (5,5 kg/h), nas restantes experiências de combustão obtiveram-se valores semelhantes em torno de 4,5 kg/h.

Na Figura 5.1 observa-se a velocidade do consumo de biomassa global e a velocidade de consumo de biomassa nos dois períodos principais do processo de combustão. Observa-se uma velocidade de consumo de biomassa global (ciclo completo de combustão de uma carga de combustível) superior na experiência com pinheiro bravo (1,96 kg/h), em resultado dos elevados valores de velocidade de consumo de biomassa observados no primeiro período de combustão com pinheiro bravo (3,57 kg/h) relativamente aos outros combustíveis. No período de combustão do carbonizado observaram-se maiores velocidades de consumo de biomassa nas experiências de combustão com azinheira (0,91 kg/h) e com carvalho negral (1,02 kg/h). Devendo-se ao facto de neste período de combustão haver maior disponibilidade de massa de carbonizado quando comparada com os restantes combustíveis. Pode-se ainda justificar estes resultados pelas características físico-químicas da madeira, nomeadamente os valores de densidade, dado que, a velocidade de consumo de biomassa de madeira com maior densidade apresenta valores inferiores durante o primeiro período de combustão de uma carga de biomassa.

No geral não se observam diferenças significativas em relação à velocidade de consumo de biomassa de diferentes tipos de madeira. Observa-se que o primeiro período de combustão é responsável por uma maior conversão das partículas carbonáceas e que a velocidade de consumo de biomassa representa mais do dobro da verificada no segundo período de combustão. Dado que, no primeiro período de combustão há presente maior quantidade de combustível, excesso de ar e elevadas temperaturas que contribuem para melhores condições de combustão.

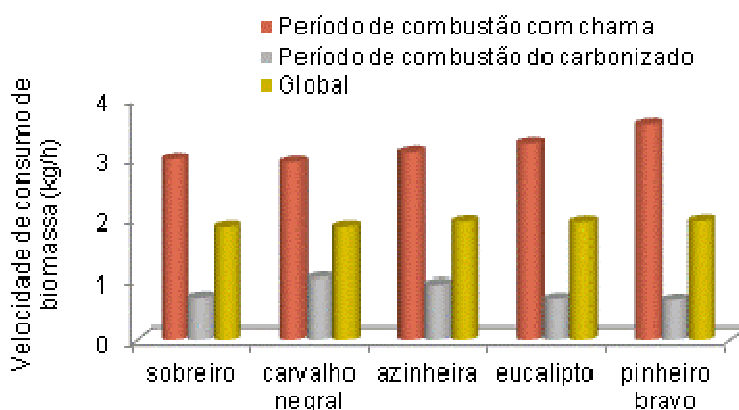


Figura 5.1 – Velocidade média de consumo de biomassa nas experiências de combustão.

Na Figura 5.2 observam-se as temperaturas médias na câmara de combustão e nos gases de exaustão nas diferentes experiências de combustão. Observou-se uma temperatura máxima acima da grelha superior nas experiências de combustão com carvalho negral (765 °C) e azinheira (755 °C). No entanto, em termos médios, observaram-se valores de temperatura mais elevados na experiência de combustão com sobreiro (410 °C), eucalipto (395 °C) e pinheiro bravo (387 °C).

A temperatura mais elevada nos gases de exaustão foi observada na experiência de combustão com azinheira (306 °C) e com carvalho negral (299 °C). Por outro lado, em termos médios observam-se valores superiores de temperatura nos gases de exaustão na experiência de combustão com pinheiro bravo (197 °C), eucalipto (191 °C) e sobreiro (180 °C).

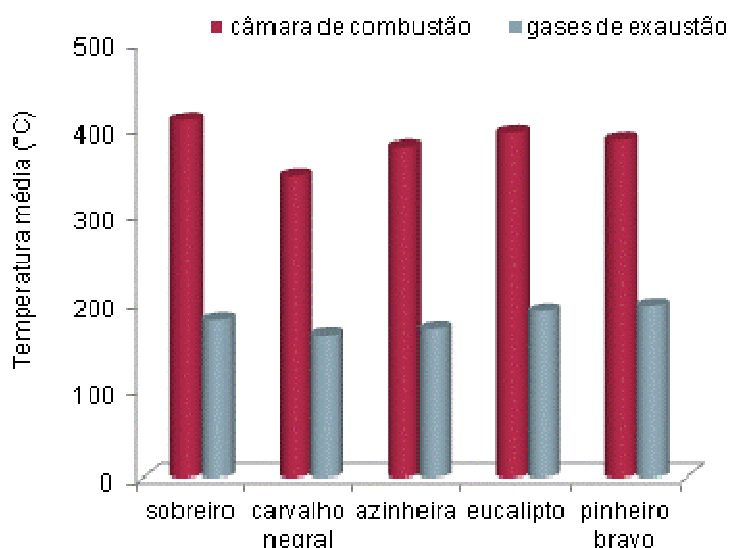


Figura 5.2 - Temperatura média na câmara de combustão e nos gases de exaustão nas experiências de combustão.

As concentrações de pico de inqueimados são avaliadas em termos de emissões de CO e CH₄. Observaram-se valores máximos de concentração de CO superiores nas experiências de combustão com carvalho negral e com pinheiro bravo, rondando sensivelmente os 10000 ppmv, em gases secos. De modo análogo, também o pico máximo de concentração de CH₄ foi registado nas experiências de combustão com carvalho negral (7000 ppmv em gases húmidos) e com pinheiro bravo (5200 ppmv em gases húmidos). Não é possível assumir que a combustão de um tipo de madeira promove maior emissão de inqueimados, uma vez que está dependente do

caudal de gases de combustão, o que interfere na diluição da concentração dos gases à saída da conduta de exaustão. Uma opção viável seria transformar os valores observados numa base de concentração de oxigénio normalizada, porém não seria reflexo da realidade ocorrida nas experiências de combustão.

A concentração de compostos inqueimados máxima observou-se no primeiro período de combustão de uma carga de biomassa e está directamente relacionada com as condições de início de cada ciclo de combustão, como factos responsáveis tem-se a baixa temperatura na câmara de combustão, inferior a uma gama entre 150 a 200 °C, durante a alimentação da carga de combustível, e ainda a não ignição da mistura gasosa (resultante da desvolatilização da biomassa e da mistura dos voláteis com o ar de combustão) após o fecho da porta da câmara de combustão.

Na Figura 5.3 constam os diferentes valores de potência determinados para cada experiência de combustão.

Durante o primeiro período de combustão de uma carga observam-se potências superiores. Durante este período a potência perdida nos gases de exaustão é tanto maior quanto maior for a potência introduzida no sistema, causada pela quantidade de energia envolvida.

A potência média perdida nos gases de exaustão foi superior nas experiências de combustão com pinheiro bravo (2,9 kW_{th}), eucalipto (2,9 kW_{th}) e sobreiro (2,7 kW_{th}). Observou-se um valor superior de potência média introduzida no sistema na experiência de combustão com sobreiro (10,0 kW_{th}) e pinheiro bravo (9,7 kW_{th}), embora diferenças pouco significativas em relação aos restantes tipos de madeira.

Por conseguinte, observaram-se maiores valores de potência útil do equipamento nas experiências de combustão com sobreiro (7,3 kW_{th}) e azinheira (7,2 kW_{th}). Genericamente, durante as experiências de combustão, os valores de potência do fogão rondam os valores da literatura para este tipo de equipamento de combustão (9,8 a 18,2 kW_{th}).

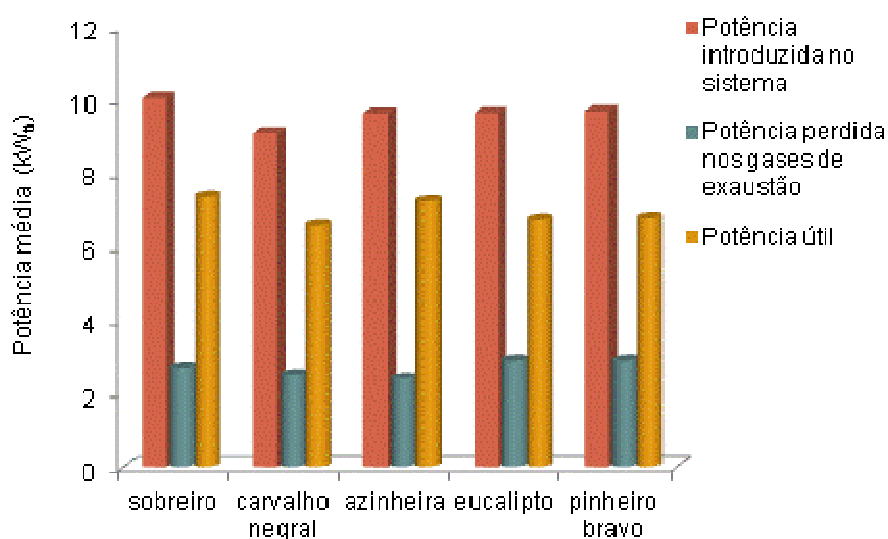


Figura 5.3 - Potências médias do equipamento nas experiências de combustão.

Relativamente à eficiência de conversão energética máxima do equipamento observaram-se valores mais elevados nas experiências de combustão com sobreiro (87,0 %), pinheiro bravo (83,7 %) e eucalipto (83,6 %).

Na Figura 5.4 são observados os valores médios de eficiência de conversão energética do fogão nas diferentes experiências de combustão. Observaram-se eficiências médias de conversão energética de 66,5 %, 60,9 %, 68,4 %, 60,4 % e 64,7 %, respectivamente na combustão com eucalipto, pinheiro bravo, azinheira, carvalho negral e sobreiro. Os valores médios de eficiência de conversão energética são próximos do valor estimado para este tipo de equipamento (aproximadamente 75 %).

Observa-se que, não existem diferenças significativas entre a eficiência de conversão energética, da combustão de folhosas e resinosas, no fogão doméstico.

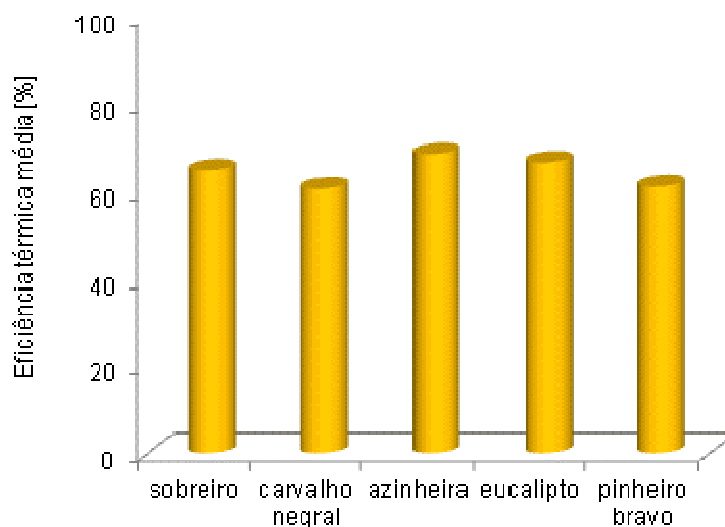


Figura 5.4 - Eficiência de conversão energética média do equipamento nas experiências de combustão.

No primeiro período de combustão foram observados picos de potência máxima em torno dos 20 kW_{th}, uma vez que neste período há maior disponibilidade de comburente e de combustível na grelha, possibilitam uma maior conversão energética. A válvula de admissão de ar de combustão detinha a abertura máxima, concedendo uma maior admissão de ar à câmara de combustão, mas também maior turbulência. Portanto, contribuiu para uma maior mistura ar-combustível, maior transferência de massa e calor, permitindo a obtenção de maiores potências, embora de forma não controlada.

Não foram observadas diferenças significativas entre a combustão dos diferentes tipos de madeira. Como tal, as condições de combustão, as características do combustível e o caudal de ar de combustão constituem aspectos importantes a considerar na melhoria do desempenho dos equipamentos de combustão doméstica.

Na combustão doméstica são incorporadas cargas com diferentes tipos de madeira, deste modo, a co-combustão de diferentes tipos poderá ser uma opção de interesse, conjugando as diferentes características dos combustíveis, de forma a contribuir para um aperfeiçoamento do desempenho do equipamento.

6 CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Este trabalho teve por base a concretização de objectivos que se relacionam com a caracterização de alguns tipos de madeira e da sua combustão num fogão doméstico. Foi efectuada a análise imediata e elementar de vários tipos de madeira incluindo madeira de folhosas e resinosas. Efectuou-se a monitorização do processo de combustão da madeira num fogão doméstico e foi determinada a potência térmica útil e a eficiência de conversão energética do equipamento.

6.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi estudada a combustão de cinco tipos de madeira num fogão doméstico. A madeira utilizada foi obtida a partir de árvores de resinosas e folhosas. A madeira de folhosas inclui o sobreiro, o carvalho negral, a azinheira e o eucalipto. A madeira de resinosa correspondeu ao pinheiro bravo.

Do ponto de vista de características do combustível, verificou-se que a humidade dos vários tipos de madeira utilizada era análoga e estava na gama de 8 a 10 % (btq). Uma das diferenças mais significativas foi observada ao nível do conteúdo em cinzas. A madeira de azinheira e de sobreiro é aquela que apresenta maior conteúdo em cinzas, e a madeira de pinheiro bravo a que apresenta um menor conteúdo em cinzas. A madeira que apresentou um maior conteúdo em matéria volátil foi a de carvalho negral, e a amostra com menor conteúdo foi a de pinheiro bravo. Em termos do conteúdo em carbono fixo a amostra com conteúdo superior foi a de pinheiro bravo e a amostra com conteúdo inferior foi a de carvalho negral. Relativamente à amostra de carvalho negral observaram-se valores diferentes dos observados na literatura. A razão para este resultado pode residir na possível ocorrência de erros durante o método de determinação do conteúdo em matéria volátil, conduzindo à conversão (oxidação) de parte do conteúdo em carbono fixo na amostra, quando deveria ter ocorrido apenas a desvolatilização.

Relativamente à combustão de biomassa no fogão doméstico, verificou-se que o ciclo de combustão de uma carga de biomassa é caracterizado por dois períodos principais: i) um primeiro período, durante o qual ocorre secagem, a desvolatilização e a combustão dos voláteis, e ao qual está associado a presença de uma chama intensa na câmara de combustão, e ii) um segundo período, caracterizado pela combustão do carbonizado, durante grande parte do qual não se observa ocorrência de chama.

Durante o primeiro período de combustão a velocidade de conversão das partículas de biomassa é avaliada com base na evolução da massa de biomassa na grelha, foi muito superior ao observado durante o segundo período (combustão do carbonizado). Consequentemente, durante os primeiros dez a vinte minutos do ciclo de combustão dum carga de biomassa ocorre uma libertação de energia superior, e observa-se uma temperatura mais elevada na câmara de combustão e nos gases de exaustão, quando comparado com o observado durante o segundo período de combustão.

Dum modo geral, não foi observada uma diferença significativa entre a combustão de madeira de folhosa e de resinosas no fogão doméstico. Algumas diferenças que podem ser indicadas foram observadas ao nível da velocidade de consumo de biomassa em diferentes períodos do ciclo de combustão de uma carga. Por exemplo, a velocidade de consumo de biomassa durante um ciclo completo de combustão de uma carga de combustível foi superior nas experiências com pinheiro bravo. Este resultado foi principalmente condicionado pelos elevados valores de consumo de biomassa durante o primeiro período, quando comparado com o que sucedeu com os outros combustíveis. De facto, durante o período de combustão do carbonizado observou-se um consumo de combustível superior nas experiências com madeira de azinheira e de carvalho negral. Este comportamento está relacionado com o facto de, durante a conversão destes combustíveis, a massa de carbonizado disponível durante este segundo período ser mais elevada do que a observada no caso de outros combustíveis (por exemplo, pinheiro bravo); este comportamento pode ser justificado pelas características físico-químicas da madeira, nomeadamente os diferentes valores de densidade e reactividade do combustível. De forma complementar, os combustíveis mais densos apresentam uma velocidade de consumo mais lenta durante o primeiro período de combustão de uma carga de biomassa.

A temperatura máxima na câmara de combustão e nos gases de exaustão foi observada nas experiências de combustão com carvalho negral e com azinheira, ao passo que, em termos médios observaram-se temperaturas superiores nas experiências de combustão com sobreiro, com pinheiro bravo e com eucalipto.

As concentrações mais elevadas de inqueimados (CH_4 e CO) foram observadas nas experiências de combustão com carvalho negral e pinheiro bravo. Estes valores foram observados durante o primeiro período de combustão de uma carga de biomassa, e estão relacionados com as condições de início de cada ciclo de combustão; entre as razões responsáveis por este comportamento estão a baixa temperatura na câmara de combustão aquando da alimentação da carga de biomassa, e a não ignição da mistura gasosa (resultante da desvolatilização do

combustível e mistura com o ar de combustão) após o fecho da porta da câmara de combustão. A composição dos gases de combustão é influenciada pelas características da biomassa, temperatura na câmara de combustão, temperatura dos gases de exaustão e caudal de ar de combustão.

A potência térmica útil do fogão durante as experiências de combustão está dentro da gama de valores típicos (9 a 18 kW_{th}) referidos na literatura para este tipo de equipamentos. Os valores mais elevados de potência térmica útil média (durante um ciclo de combustão de uma carga de biomassa) do fogão foram observados durante as experiências com sobreiro e azinheira, e corresponderam a valores de cerca de 7 kW_{th}.

A eficiência média de conversão de energia observada nas várias experiências no fogão está na gama de 61 a 68 %.

Para melhorar a eficiência energética do fogão, por exemplo para valores na ordem de 75 %, sugere-se que a adição de cargas de combustível seja realizada com temperaturas na câmara de combustão na ordem dos 200 a 250 °C.

Em resumo, as condições de combustão e as características do combustível constituem aspectos importantes a considerar na melhoria do desempenho destes equipamentos de combustão doméstica.

A combustão doméstica de madeira em fogões para aquecimento não inclui apenas um dos vários tipos de madeira. Neste sentido, provavelmente a co-combustão de diversos tipos de madeira poderá ser uma opção com interesse, pois permitirá tirar partido das propriedades de diferentes combustíveis no sentido de melhor o desempenho desta tecnologia.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros sugere-se a medição contínua de temperaturas não apenas na câmara de combustão e nos gases de exaustão, como também no interior de partículas carbonáceas em combustão. Esta análise da temperatura atingida no interior de uma partícula durante uma experiência de combustão, poderá permitir caracterizar melhor a forma como a partícula de biomassa é convertida.

É importante efectuar a co-combustão de tipos de madeira diferentes e combustão de madeira em separado, permitindo averiguar possíveis progressos na eficiência térmica do equipamento.

Sugere-se ainda um estudo, que se baseie na determinação da composição química, mais pormenorizada, dos principais tipos de madeira utilizados em Portugal, tanto ao nível do conteúdo em cinzas, em matéria volátil, em carbono fixo, como ao nível de compostos estruturais dos quais, celulose, hemicelulose e lenhina, assim como de compostos não estruturais (compostos extractáveis).

Referências Bibliográficas

- ABREU, Pedro T A C J. Investigação Experimental da taxa de formação de depósitos na Co-Combustão de carvão com biomassa. Dissertação apresentada ao Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, 2009.
- ALLEN, R W, Leckie S, Millar G & Brauer M. The impact of wood stove technology upgrades on indoor residential air quality. *Atmospheric Environment*, 2009; 43: 5908-5915.
- ARBEX, Marcos Abdo, Cançado J E D, Pereira L A A, Braga A L F & Saldiva P H N. Queima de Biomassa e Efeitos Sobre a Saúde. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 2004; v. 30, 2: 158-175.
- BIOMASS ENERGY CENTER (2010). Wood as Fuel – Technical Supplement for Fuel Suppliers. Forestry Commission, England.
- BLASI, Colomba Di. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008; 34: 47–90.
- BORREGO, Carlos, Valente J, Carvalho E, Sá E, Lopes M & Miranda A I. Contribution of residential wood combustion to PM10 levels in Portugal. *Atmospheric Environment*, 2010; 44: 642-651.
- CAMACHO, João L F. Desenvolvimento dum modelo dinâmico aplicado à combustão de cargas de biomassa em fogões domésticos. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, 2008.
- CARDOSO, Sónia C G. Quantificação da biomassa residual em povoamentos de pinheiro manso (*Pinus pinea* L.). Dissertação apresentada no Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Florestal e Gestão dos Recursos Naturais, 2010.
- CARVALHO, Ricardo L T. Eficiência de fogões a biomassa e impactos na qualidade do ar interior. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Sistemas Energéticos Sustentáveis, Departamento de Economia, Gestão e Engenharia Industrial, 2010.
- DEC (Department of Environment and Conservation) (2009). Wood Heater Compliance Requirements 3. Air Quality Information Sheet, Australia.
- DERMIBAS, Ayhan. Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion in boiler power systems and combustion related environment issues. *Progress in energy and Combustion Science*, 2005; 31: 171-192.
- DIAS, João. Utilização da biomassa: avaliação dos resíduos e utilização de *pellets* em caldeiras domésticas. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico. 2002.

DIAS, J, Costa M & Azevedo J L T. Test of a small domestic boiler using different pellets. Biomass and Bioenergy, 2004; 27: 531-539.

EPA ARB (EPA Air Resources Board) (2005). Wood Burning Handbook-Protecting the Environment and Saving Money. California Environment Protection Agency, USA.

FERNANDES, Ana P S. Emissão de PM_{2,5} e gases em sistemas domésticos de queima de biomassa. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, 2009.

FERREIRA, Paulo J T. Estudo de pastas *Kraft* de *Eucalyptus globulus*: Características estruturais e aptidão papelreira. Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, para obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química, 2000.

FINE, P, Cass G & Simoneit B. Chemical characterization of particle emissions from fireplace combustion of woods grown in the northeastern United States. Environment Science and Technology, 2001; 35: 2665-75.

FREITAS, Gil A S. Deslenhificação de materiais lenhinocelulósicos para bioconversão. Dissertação apresentada à Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro para obtenção do Grau de Mestre em Tecnologias Ambientais, Vila Real, 2008.

GAEGGELER, Kathrin, Prevot A S H, Dommen J, Legreid G, Reimann S & Baltensperger U. Residential wood burning in an Alpine valley as a source for oxygenated volatile organic compounds, hydrocarbons and organic acids. Atmospheric Environment, 2008; 42: 8278-8287.

GONÇALVES, Cátia, Alves C, Evtyugina M, Mirante F, Pio C, Caseiro A, Schmidl C, Bauer H & Carvalho F. Characterization of PM₁₀ emissions from woodstove combustion of common woods grown in Portugal. Atmospheric Environment, 2010; 44: 4474-4480.

HOUCK, J E, Goulet J M, Chow J C & Watson J G. Chemical source characterization of residential wood combustion emissions in Denver, Colorado; Bakersfield, California; and Mammoth Lakes, California. Development, 1989.

HOUCK, J, Tiegs P E & Mccillis R C. Residential wood combustion technology review. Volume1. Technical report. U.S. Environmental Protect Agency, 1998.

HOUCK, James & Eagle Brian N. Hardwood or Softwood. Hearth & Home, OMNI Environmental Services, 2007.

JENKINS, B, Baxter L, Miles Jr T & Miles T. Combustion properties of biomass. Fuel Processing Technology, 1998; 54: 17-46.

JOHANSSON, Linda, Leckner B, Gustavsson L, Cooper D, Tullin C & Potter A. Emissions characteristics of a modern and old-type residential boilers fired with logs and wood pellets. Atmospheric Environment, 2004; 38: 4183-4195.

JOHANSSON, Linda, Tullin C, Leckner B & Sjöjovall P. Particle emissions from biomass combustion in small combustors. *Biomass & Bioenergy*, 2003; 25: 435-466.

KLIPPEL, N & Nussbaumer T. Health relevance of particles from wood combustion in comparison to diesel soot. 15th European Biomass Conference and Exhibition, 2007, Berlim.

KOYUNCU, T & Pinar Y. The emissions from a space-heating biomass stove. *Biomass and Bioenergy*, 2007; 31: 73-79.

LARSON, T & Koenig J. Wood smoke: Emissions and noncancer respiratory effects. *Annual Review of public health*, 1994; 15: 133-56.

LAUNHARDT, T & Thoma, H. Investigation on organic pollutants from domestic heating system using various solid biofuels. *Chemosphere*, 2000; 40: 1149-1157.

LOO, Sjaak Van & Koppijan, Jaap (*editors*). The handbook of biomass combustion and co-firing. page 112-120, United Kingdom, 2008. Disponível em:

http://books.google.pt/books?id=KE565zmFumQC&pg=PA112&lpg=PA112&dq=softwood+vs+hardwood+combustion+stoves+for+domestic+heating&source=bl&ots=wHzdFi7gkq&sig=I5aUO1M6P3TKing95RLaB4UsNk&hl=pt-PT&ei=m6qsTIOXBIOQjAe96KDMCw&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=7&ved=0CEEQ6AEwBg#v=onepage&q&f=false

LOUÇÃO, Ilídio J G. Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença do nemátodo de pinheiro, para produção de *pellets*. Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa para obtenção do Grau de Mestre em Bioenergia, 2008.

NUSSBAUMER, T, Doberer A, Klippel N, Bühler R & Vock W. Influence of ignition and operation type on particles emissions from residential wood combustion. 16th European Biomass Conference and Exhibition, 2-6 June 2008, Valencia, Spain.

NDIEMA, C K W, Mpendazol F M & Williams A. Emissions of pollutants from a biomass stove. *Energy Conversion and Management*, 1998; 39: 1357-1367.

NIELSEN, N, Nørgaard L, Strobel B & Felby C. Effect of storage on extractives from particle surfaces of softwood and hardwood raw materials for wood pellets. *European journal of wood and wood products*, 2008; 67: 19-26.

NOVES, H. Alvarez & Seco J I F. Practical evaluation and operation of superheated steam drying process with different softwoods and hardwoods. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 1994; 52: 135-138.

OLIVEIRA, Sara I S P G. Efeito do tratamento da biomassa arbustiva sobre as características da cinza. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, 2008.

OLSSON, Maria, Kjällstrand J. Emissions from burning of softwood pellets. *Biomass and Bioenergy*, 2004; 27: 607-611.

OLSSON, Maria. Residential biomass combustion – emissions of organic compounds to air from wood pellets and other new alternatives. Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of technology, Sweden, 2006.

OZIL, Fabien, Tschamber V, Haas F & Trouvé G. Efficiency of catalysts processes for the reduction of CO and VOC emissions from wood combustion in domestic fireplaces. *Fuel Processing Technology*, 2009; 90: 1053-1061.

PARIKKA, M. Global biomass fuel sources. *Biomass and Bioenergy*, 2004; 27: 613-620.

PEDRO, Nuno. Floresta Viva – Património de Futuro. No âmbito dos novos sistemas de gestão da biomassa florestal. Escola Superior Agrária de Castelo Branco, 2009.

PINHO¹, João. 5º Inventário Florestal Nacional – Apresentação do relatório final. Direcção Nacional de Gestão Florestal, Autoridade Florestal Nacional, 2010.

PINHO², José P R. Lixiviação de biomassa e seu efeito nos produtos de combustão. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, Departamento de Ambiente e Ordenamento, 2010.

PUXBAUM, Hans, Caseiro A, Sánchez-Ochoa A, Kasper-Giebl A, Claeys M, Gelencsér A, Legrand M, Preunkert S & Pio C. Levoglucosan levels at background sites in Europe for assessing the impact of biomass combustion on the European aerosol background. *Journal of Geophysical Research*, 2007; Vol. 112, D23S05, doi: 10.1029/2006JD008114.

IA (Instituto do Ambiente) (2005) - Relatório do Estado do Ambiente (livro de bolso). Disponível em:

<http://www.apambiente.pt/divulgacao/Publicacoes/REA/Documents/REA05-LBolso.pdf>

RYU, Changkook, Yang Y, Khor A, Yates N, Sharifi V & Swithenbank, J. Effect of fuel properties on biomass combustion: Part I. Experiments — fuel type, equivalence ratio and ratio and particle size, 2006; 85: 1039-1046.

SÁ, Artur J F. Caracterização de recolha de matéria-prima para a produção de pellets. Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Mecânica, 2009.

SAIDUR, R, Abdelaziz E A, Demirbas A, Hossain M S & Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renueable and Sustainable energy reviews*, 2011, 15: 2262-2289.

SALAZAR, P, Páscoa F, Machado C, Ferreira J G, Soares P, Carvalho P O, Teixeira I & Beck N. Manual de Procedimentos para aplicação de Indicadores de Gestão Florestal Sustentável (ficha técnica). Federação dos produtores Florestais de Portugal - Conselho Nacional da Floresta, 1998.

SANTOS, Dulcínea, Gulyurthu I & Cabrita I. Materiais e Energia. Conversão Termoquímica de Combustíveis. INETI/ DEECA, Departamento de Engenharia e Controlo Ambiental, Lisboa, 2008.

SANTOS, Joana & Santos José. Secagem natural e artificial do carvalho negral. INETI (Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação, Geomicrobiology Journal, 1995; 13: 265-279.

SIPPULA, Olli, Hytönen K, Tissari J, Raunemaa T & Jokiniemi J. Effect of wood fuel on the emissions from a top-feed pellet stove. Energy and Fuel, 2007; 21: 1151-1160.

SIMONEIT, Bernd R. T. Biomass burning – A review of organic tracers for smoke from incomplete combustion. Applied Geochemistry, 2002; 17: 129-162.

SCHMIDL, Christoph, Marr I, Caseiro A, Kotianová P, Berner A, Bauer H, Kasper-Giebl A & Puxbaum H. Chemical characterization of the particle emissions from wood stove combustion of common woods growing in mid-European Alpine regions. Atmospheric Environment, 2008; 42: 126-141.

TARELHO, Luís A. C. (2008). Módulo C - Tratamento Termoquímico de Resíduos. Operações de Tratamento de Resíduos, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro.

TISSARI, J, Hytönen K, Lyyrinen J & Jokiniemi J. A novel field measurement method for determining fine particle and gas emissions from residential wood combustion. Atmospheric Environment, 2007; 41: 8330-8344.

TORRES, Amândio (2010). O sector florestal. Eco-Escolas – Seminário Nacional, Autoridade Florestal Nacional.

WERTHER, J, Saenger M, Hartge E, Ogada T & Siagi Z. Combustion of agricultural residues. Progress in Energy and Combustion Science, 2000; 26: 1-27.

SÍTIOS NA INTERNET

UR1 - (consultado em Fevereiro de 2011):

http://oee.nrcan.gc.ca/publications/infosource/pub/Heat_and_Cool/Wood_Fireplaces_Section3.cfm

URL2 - (consultado em Fevereiro de 2011):

http://www.diffen.com/difference/Hardwood_vs_Softwood

URL3 - (consultado em Fevereiro de 2011):

http://en.wikipedia.org/wiki/Wood-burning_stove

URL4 - (consultado em Fevereiro de 2011):

http://www.grahamandrews.com/burning_firewood.htm

URL5 - (consultado em Fevereiro de 2011):

http://www.bois-sec-chauffage-firewood.com/dry_firewood/burning_firewood_security.htm

URL6 - (consultado em Maio de 2011):

http://www.dmu.dk/oldnews/wood_combustion/

URL7 - (Consultado em Julho de 2011):

<http://www.epa.gov/burnwise/woodstoves.html>

URL8 - (consultado em Setembro de 2011):

<http://www.madeidura.com/madeiras/madeira-de-eucalipto/caracteristicas>

ANEXO A – DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO EM HUMIDADE, EM CINZAS, EM MATÉRIA VOLÁTIL E EM CARBONO FIXO

A1 – Preparação das amostras de madeira para análise

Serraram-se partículas carbonáceas de vários tipos de madeira (eucalipto, carvalho negral, sobreiro, azinheira e pinheiro bravo) para obter serrim, o qual é crivado com crivo manual de 1 mm de malha.

Efectua-se a calcinação de cadinhos, conduzindo-os à mufla durante 1 hora a 550 °C e posteriormente são reservados no exsicador.

De cada tipo de madeira são necessários mais que 3 g de serrim (para a determinação do conteúdo em humidade, do conteúdo em cinzas e do conteúdo em matéria volátil), uma vez que posteriormente cada amostra deverá possuir uma massa superior a 1 g sensivelmente. As amostras são dispostas em cadinhos com massa registada previamente, sendo deste modo efectuadas três réplicas para cada tipo de biomassa e para cada determinação. No total tem-se 15 cadinhos em cada determinação (conteúdo em humidade, conteúdo em cinza e conteúdo em matéria volátil).

Depois de preparadas as amostras devem ser homogeneizadas, e são então colocadas em cadinhos, num exsicador sem sílica, por serem higroscópicas. No registo das massas utiliza-se uma balança analítica com uma precisão de 4 casas decimais.

A2 – Determinação do conteúdo em humidade, segundo a norma Europeia CEN/TS 14774-3, 2004, *Solid biofuels – Methods for the determination of moisture content – oven dry method – Part 3: Moisture in general analyses sample*

Material

- Estufa com capacidade para controlar a temperatura até 105 °C, com uma variação de ± 2 °C, com renovação de ar entre 3 a 5 vezes por hora;
- Cadinhos de porcelana resistentes ao calor e não corrosivos, com um tamanho que permita que a amostra não exceda 0,2 g/cm²;
- Balança com precisão não inferior a 0,1 mg;

- Excicador sem sílica;
- Três réplicas para cada amostra de serrim (com diâmetro igual ou inferior a 1 mm).

Procedimento

Colocar as amostras preparadas no ponto **A1** (cerca de 1 g de amostra por cadinho) na estufa a 105 °C durante um período de 60 minutos. Após o qual as amostras são reservadas a arrefecerem 10 a 15 minutos no excicador, sem sílica, e assim que atingirem a temperatura ambiente registar a massa. Em seguida repetir o procedimento anterior até não se observar variação de massa, ou seja que a variação não exceda 1 mg.

No geral o processo de secagem em estufa pode levar entre 2 a 3 horas. Ao fim desse período retirar para o excicador, deixar arrefecer durante 30 minutos sensivelmente, para que as amostras arrefeçam na totalidade. Registar a massa, tendo o cuidado de garantir que o processo é rápido. Para a determinação do conteúdo em humidade, em base tal e qual, seguiu-se a Equação A1.

$$\text{Conteúdo em humidade [\%btq]} = \frac{m_2 - m_3}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Equação A1}$$

Sendo m_1 a massa do cadinho vazio, m_2 a massa do cadinho com a amostra antes da secagem e m_3 a massa do cadinho com a amostra depois do processo de secagem. Seguidamente sugere-se reservar no excicador para posteriormente proceder à determinação do conteúdo em cinzas.

A3 – Determinação do conteúdo em cinzas, segundo a norma CEN/TS 14775, 2004, *Solid biofuels – Method for the determination of ash content*

Material

- Cadinho de porcelana com área superficial não superior a 0,1 g/cm²;
- Mufla com capacidade de manter uma temperatura uniforme, dentro dos tempos específicos requeridos e com ventilação suficiente para que não haja ausência de oxigénio durante o processo de aquecimento;

- Balança com precisão não inferior a 0,1 mg;
- Excicador sem sílica.

Procedimento

Depositar as amostras pré-secas dentro da mufla ainda desligada, de seguida ligar e programar para os 100 °C. Assim que atingir os 100 °C aumentar a temperatura a uma taxa de 5 °C/min, até aos 250 °C. Atingindo o patamar dos 250 °C, permanecer durante 1 hora.

Findo este tempo, aumentar a temperatura a uma taxa de 2,5 °C/min, até aos 300 °C. Dos 300 aos 550 °C efectuar o aumento de temperatura a uma taxa de 5 °C/min. Quando atingir os 550 °C permanecer durante 2 horas.

Ao fim do tempo decorrido, retirar os cadinhos e deixar arrefecer numa superfície resistente a altas temperaturas, durante pelo menos 5 a 10 minutos, depois reservar as amostras no excicador sem sílica. Ao fim de 30 minutos, sensivelmente, proceder ao registo de massas.

Para a determinação do conteúdo em cinzas, em base tal e qual, usou-se a Equação A2.

$$\text{Conteúdo em cinzas [\%btq]} = \frac{m_3 - m_1}{m_2 - m_1} \times 100 \quad \text{Equação A2}$$

Sendo m_1 a massa do cadinho vazio, m_2 a massa do cadinho com a amostra pré-seca e m_3 a massa do cadinho com cinzas.

A4 – Determinação do conteúdo em matéria volátil, segundo a norma CEN/TS 15148, 2005, *Solid biofuels – Method for the determination of the content of volatile matter*

Material

- Mufla aquecida electricamente, capaz de manter uma temperatura uniforme de 900 °C ± 10 °C, estando a entrada de ar fechada. Deverá possuir fornecimento de azoto a uma taxa de 1 L/min sensivelmente;
- Usar cadinhos de porcelana com tampa, as amostras são colocadas na mufla com a tampa;

- Balança com precisão não inferior a 0,1 mg.

Procedimento

Efectuar a calcinação dos cadinhos e tampas a 900 °C durante 15 minutos. Seguidamente, colocar cerca 1 g de amostra (pré-seca) de serrim dentro de cada cadinho e colocar a tampa. Utilizar caudalímetro para calibrar o caudal de fornecimento de azoto na mufla, este deverá ser de 1 L/min aproximadamente.

Após a disposição dos cadinhos na mufla, ligar e programar para um aquecimento por patamares até aos 900 °C. Inicia-se o aquecimento com uma taxa de 5 °C/min até aos 280 °C, permanecendo durante 15 minutos. Segue-se uma rampa de 5 °C/min até aos 400 °C e permanece durante 2 minutos. Até aos 650 °C a mufla irá aquecer o mais depressa possível e depois permanecerá a essa temperatura durante 15 minutos. Torna a efectuar uma rampa de aquecimento rápido até aos 900 °C, após atingir este patamar deverá permanecer durante 15 minutos, após o qual inicia o arrefecimento até aos 200 °C. Após o arrefecimento retirar os cadinhos da estufa e reservar a arrefecer por 30 minutos no exsicador, no fim registar as massas. Para a determinação do conteúdo em matéria volátil, em base tal e qual, recorreu-se à Equação A3.

$$\text{Conteúdo em matéria volátil } [\%_{\text{btq}}] = \left[\frac{100 \cdot (m_2 - m_3)}{m_2 - m_1} - \% \text{humidade}_{\text{btq}} \right] \quad \text{Equação A3}$$

Sendo m_1 a massa do cadinho com tampa vazio, m_2 a massa do cadinho com tampa e com amostra pré-seca, m_3 a massa do cadinho com tampa após o processo na mufla.

O conteúdo em carbono fixo obtém-se pela Equação A4.

$$\text{Conteúdo em carbono fixo } [\%_{\text{btq}}] = 100\% - [\% \text{voláteis}_{\text{btq}} + \% \text{cinzas}_{\text{btq}}] \quad \text{Equação A4}$$

ANEXO B – VALORES INTERMÉDIOS À DETERMINAÇÃO COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS

Neste anexo constam as tabelas de registo de massas intermédias, que permitiram a determinação do conteúdo em humidade, conteúdo em cinzas, conteúdo em matéria volátil e conteúdo em carbono fixo de cada amostra de serrim de madeira (sobreiro, carvalho negral, azinheira, eucalipto e pinheiro bravo).

Tabela B 1 – Registo de massas intermédias e conteúdo em humidade e em cinzas, em base tal e qual.

	Réplicas	m cadinho (g)	m amostra (g)	m cadinho+amostra (1) (g)	m cadinho+amostra (2) (g)	conteúdo médio em humidade (%)	m cadinho+cinza (g)	conteúdo médio em cinzas (%)
Sobreiro	#1	34,6198	1,0394	35,5688	35,5488		34,6521	
	#2	39,8738	1,0304	40,8178	40,8119	9,80	39,8986	3,04
	#3	39,7338	1,0431	40,6890	40,6745		39,7620	
Pinheiro Bravo	#1	33,4407	1,0041	34,3452	34,3550		33,4438	
	#2	37,5527	1,0025	38,4702	38,4647	9,08	37,5560	0,33
	#3	39,2772	1,0028	40,1889	40,1871		39,2797	
Azinheira	#1	40,0754	1,0026	40,9942	41,0019		40,1219	
	#2	42,4846	1,0028	43,4138	43,4054	8,39	42,5205	4,33
	#3	40,1659	1,0025	41,0790	41,0822		40,2033	
Carvalho Negral	#1	39,5009	1,0026	40,4283	40,4225		39,5307	
	#2	35,0387	1,0024	35,9607	35,9605	7,94	35,0637	2,97
	#3	34,6893	1,0025	35,6144	35,6147		34,7167	
Eucalipto	#1	41,0826	1,0025	41,9991	41,9988		41,0880	
	#2	44,2430	1,0022	45,1617	45,1622	8,48	44,2500	0,69
	#3	43,3360	1,0024	44,2566	44,2527		43,3426	

Uma vez que o conteúdo em humidade e o conteúdo de cinzas foram determinados com algumas semanas de diferença da determinação do conteúdo em voláteis, foi necessário serrar mais amostra e secar as amostras na estufa. Este processo foi feito de modo semelhante ao já indicado, assim no total as amostras de biomassa foram 2 horas à estufa a 105°C. Determinou-se um novo conteúdo de humidade que como se pode observar não é muito diferente do valor da tabela anterior. O valor médio para o conteúdo de humidade nesta segunda determinação foi de 8,83 %, é no entanto de salientar que neste caso as massas de madeira na estufa eram superiores.

Tabela B2 – Registo de massas intermédias e conteúdo em humidade (em base tal e qual), que antecedeu a determinação do conteúdo em matéria volátil.

	m caixa de petri (g)	m amostra base tal e qual (g)	m caixa de petri + amostra (g)	m caixa de petri + amostra (1h+1h) (g)	conteúdo em humidade (%)
Sobreiro	79,7642	18,2758	98,0400	96,2683	9,69
Pinheiro bravo	69,5594	14,8292	84,3886	83,0140	9,27
Azinheira	70,3781	16,3567	86,7348	85,3517	8,46
Carvalho negral	69,6259	11,8074	81,4333	80,4574	8,27
Eucalipto	82,6121	11,5940	94,2061	93,2243	8,47

Na tabela seguinte encontram-se as massas registadas para a determinação do conteúdo em matéria volátil. Posteriormente utilizaram-se as mesmas amostras para determinar o conteúdo em cinzas, de forma a obter o conteúdo em carbono fixo (equação A4).

Tabela B3 - Registo de massas intermédias e determinação do conteúdo em matéria volátil e em carbono fixo, em base tal e qual.

	Réplicas	m cadinho+tampa		m amostra bs	m cadinho+tampa+resíduos		conteúdo médio em voláteis (%)	m cadinho+tampa+cinzas	Conteúdo médio em		conteúdo médio em carbono fixo (%)
		(g)	(g)		(g)	(g)			cinza (%)		
Sobreiro	#1	35,0512	1,0076		35,1882	35,0728					
	#2	36,7600	1,0061		36,8769	36,7818	77,28		2,15		20,57
	#3	36,2751	1,0009		36,4139	36,2965					
Pinheiro Bravo	#1	34,7159	1,0011		34,8787	34,7190					
	#2	36,7475	1,0003		36,9274	36,7501	73,72		0,26		26,02
	#3	36,5618	1,0004		36,7298	36,5640					
Azinheira	#1	38,0395	1,0016		38,2063	38,0830					
	#2	34,6298	1,0008		34,7925	34,6715	75,04		4,31		20,65
	#3	35,1304	1,0011		35,2966	35,1745					
Carvalho Negral	#1	36,5415	1,0005		36,5860	36,5772					
	#2	36,5372	1,0008		36,5898	36,5736	87,35		3,55		9,09
	#3	34,8716	1,0010		34,9061	34,9062					
Eucalipto	#1	36,5132	1,0008		36,5713	36,5187					
	#2	34,8570	1,0012		34,9220	34,8639	85,48		0,58		13,95
	#3	36,5208	1,0009		36,5795	36,5257					